

## МАТЕРИАЛЫ

# XVIII ОБЩЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ И ВЫСТАВКИ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

28 ноября – 1 декабря 2023 года  
г. Москва



**ООО «Геомаркетинг»**

**ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий  
в строительстве»**

**Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» –  
Общероссийское отраслевое объединение работодателей**

**Союз изыскателей**

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ  
ИЗЫСКАНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ  
В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**МАТЕРИАЛЫ XVIII ОБЩЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
ИЗЫСКАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**28 ноября – 1 декабря 2023 г.**

**МОСКВА  
2023**

**Geomarketing LLC**

**Russian Geotechnical Institute LLC**

**Russian Geotechnical Association**

**The Union of Prospectors**

**PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF ENGINEERING  
SURVEY IN RUSSIAN FEDERATION**

**MATERIALS OF THE XVIII ALL-RUSSIAN CONFERENCE  
OF PROSPECTING ORGANIZATIONS**

**28 November – 1 December 2023**

**MOSCOW  
2023**

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

**Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации.**

Материалы Восемнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций.

М.: ООО «Геомаркетинг». 2023. – 328 с.

28 ноября – 1 декабря 2023 г. в г. Москве редакцией журнала «Инженерные изыскания» совместно с ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве» (ООО «ИГИИС»), Ассоциацией «Инженерные изыскания в строительстве» – Общероссийское отраслевое объединение работодателей («АИИС») и Союзом изыскателей была проведена Восемнадцатая Общероссийская научно-практическая конференция и выставка **«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации».**

В конференции приняли участие 452 специалиста из 159 изыскательских организаций, научно-исследовательских институтов, вузов и ФАУ «Главгосэкспертиза России» из 41 города Российской Федерации: Анадырь, Белгород, Биробиджан, Воронеж, Долгопрудный, Екатеринбург, Иваново, Иркутск, Ижевск, Йошкар-Ола, Кировск, Краснодар, Казань, Красноярск, Москва, Мурманск, Нальчик, Нижний Новгород, Новокузнецк, Новосибирск, Майма Республики Алтай, Омск, Октябрьский, Пенза, Пермь, Ростов-на-Дону, Самара, Ставрополь, Санкт-Петербург, Сургут, Темрюк, Томск, Тюмень, Уфа, Ухта, Холмск, Ханты-Мансийск, Чебоксары, Череповец, Чита, Якутск. Заслушан 131 доклад.

В материалах Восемнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательский организаций **«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»** представлены публикации по различным аспектам инженерных изысканий и проектированию.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области инженерных изысканий, проектирования, строительства, экологии, для студентов и аспирантов профильных вузов.

ISBN 978-5-6050369-2-0

<https://doi.org/10.25296/978-5-6050369-2-0-2023-12-1-328>

Редакционная группа: Журавлева Н.А., Висхаджиева К.С.

Materials of the 18th All-Russian scientific and practical Conference  
“Prospects for development of engineering survey in Russian Federation”,  
Moscow, 28 November – 1 December 2023

**Prospects for development of engineering survey in Russian Federation.**

Materials of the 18th All-Russian Conference of prospecting organizations.  
Moscow: Geomarketing LLC. 2023. – 328 p.

On 28 November – 1 December 2023 editorial board of the Engineering Survey journal in conjunction with the Russian Geotechnical Institute LLC, Russian Geotechnical Association, and the Union of Prospectors held the 18th All-Russian scientific and practical Conference and Exhibition “Prospects for development of engineering survey in Russian Federation” (Moscow).

The conference was attended by 452 specialists from 159 survey organizations, research institutes, universities and Main Department of State Expertise from 41 cities of the Russian Federation: Anadyr, Belgorod, Birobidzhan, Voronezh, Dolgoprudny, Yekaterinburg, Ivanovo, Irkutsk, Izhevsk, Yoshkar-Ola, Kirovsk, Krasnodar, Kazan, Krasnoyarsk, Moscow, Murmansk, Nalchik, Nizhny Novgorod, Novokuznetsk, Novosibirsk, Mayma of the Altai Republic, Omsk, Oktyabrsky, Penza, Perm, Rostov-on-Don, Samara, Stavropol, Saint Petersburg, Surgut, Temryuk, Tomsk, Tyumen, Ufa, Ukhta, Kholmsk, Khanty-Mansiysk, Cheboksary, Cherepovets, Chita, Yakutsk. 131 reports were presented.

In the materials of the 18th All-Russian scientific and practical Conference **“Prospects for development of engineering survey in Russian Federation”** there are presented publications on various aspects of engineering survey and design.

Materials are intended for a wide range of specialists in the field of engineering surveys, design, construction, and ecology, for students and graduate students of specialized universities.

ISBN 978-5-6050369-2-0

<https://doi.org/10.25296/978-5-6050369-2-0-2023-12-1-328>

Editorial group: N.A. Zhuravleva, K.S. Viskhadzhieva

## СОДЕРЖАНИЕ

### СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

<b>Кропоткин М.П.</b> НИУ МГСУ	
<b>Фоменко И.К.</b> РГГРУ имени Серго Орджоникидзе	
<b>Сравнение вероятностных расчетов при анализе устойчивости откосов</b> <b>дорожных насыпей методом конечных элементов</b>	19
<b>Петров Н.Ф., Никитина О.В., Никонорова И.В.</b> Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова	
<b>О роли Единой унифицированной классификации оползней</b> <b>в оползневедении</b>	28
<b>Галкин С.Ю., Шарафетдинов А.И., Блажко А.В., Волков Н.Г.</b> ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС»	
<b>Сравнение эффективности полевых и лабораторных методов</b> <b>определения физико-механических свойств грунтов</b>	33
<b>Кочев А.Д.</b> ООО «Институт “Транспроектинжиниринг”»	
<b>Сведения о карстово-суффозионных воронках в г. Москве</b>	47
<b>Никитин М.С., Сенцова Е.А.</b> МГУ имени М.В. Ломоносова	
<b>Вознесенский Е.А.</b> МГУ имени М.В. Ломоносова	
<b>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН</b>	
<b>Методические аспекты обработки трехосных испытаний дисперсных</b> <b>грунтов с учетом введения поправки на изменение площади образца</b> <b>при проведении эксперимента</b>	58

### СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

<b>Авдеев В.А., Яблонский Л.И.</b> Научный геоинформационный центр РАН	
<b>Возможные перспективы развития технического регулирования</b> <b>инженерно-геодезических изысканий в строительстве</b>	63
<b>Волегжанин Д.Н.</b> Сибирский филиал ФАУ «Главгосэкспертиза России»	
<b>Применение инновационных технологий при проведении</b> <b>инженерно-геодезических изысканий</b>	71

<b>Кукушкин Д.А., Галахов В.П.</b> ООО «Геостройизыскания» <b>Актуальность и перспективы использования современных технологий в спутниковых приемниках и мобильных лазерных сканерах при инженерно-геодезических изысканиях</b>	75
<b>Смирнов Е.А., Дмитриев В.Е., Румянцева А.А., Чибуничев И.А.</b> МИИГАиК <b>Создание и оценка точности ЦМР, построенной по материалам воздушного лазерного сканирования и фотограмметрическим методом</b>	83
<b>Веселов В.В.</b> АО «Атомэнергопроект» <b>О погрешностях оценки параметров деформаций зданий и сооружений геодезическими методами</b>	90
<b>Кочнева Д.А., Гаврилюк Ф.Д., Скрыпицьна Т.Н.</b> МИИГАиК <b>Моделирование частично разрушенных архитектурных объектов по материалам наземной и аэросъемки, и любительских снимков</b>	98
<b>Курков В.М., Киселева А.С.</b> МИИГАиК <b>Подготовка и переподготовка кадров по направлению «Беспилотная аэрофотосъемка, воздушное лазерное сканирование и фотограмметрия» в МИИГАиК</b>	106
<b>СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»</b>	
<b>Стурман В.И.</b> СПГУТ имени проф. М.А. Бонч-Бруевича <b>Проблема негативного результата при инженерно-экологических изысканиях и возможные пути ее решения</b>	115
<b>Курбатова Е.С. Жуков Д.В.</b> ООО «Газпром морские проекты» <b>Алгоритм выполнения инженерно-экологических изысканий. Проблемные вопросы и пути их решения</b>	121
<b>Обатнин В.А.</b> Санкт-Петербургский филиал ООО «Газпром проектирование» <b>Создание базы данных о фоновых концентрациях тяжелых металлов и мышьяка в почвах</b>	126

**Митрофанова М.А., Косинова И.И.**

Воронежский государственный университет

**Новые подходы к оценке почв при проведении инженерно-экологических изысканий в Арктической зоне Российской Федерации** 134

**Кузиков А.А., Сущенко О.А.**

АО «НИПИГАЗ»

**К вопросу организации подхода к проведению исследований радиоопасности и газогеохимических исследований грунтов территорий промышленных объектов при инженерно-экологических изысканиях для разработки проектной документации и предложения к корректировке положений СП 502.1325800.2021** 139

## **СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»**

**Дегтярев С.Д., Перевозников Б.Ф., Пальмов В.Г.**

ОАО «Институт Гипростроймост»

**Самохин М.А.**

ОАО «Институт Гипростроймост»

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Оценка максимальных расходов воды при прорывах некапитальных плотин в инженерно-гидрометеорологических изысканиях транспортных сооружений** 148

**Мальнева И.В., Докукин М.Д., Акаев А.Р., Хаджиев М.М.**

Высокогорный геофизический институт

**Анаев М.А.**

ГУ МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике

**Условия развития склоновых процессов**

**в Кабардино-Балкарской Республике в 2022 и 2023 гг.** 159

**Кисляк У.А., Ржаницын Г.А., Фролов Д.М.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Массоперенос в снежной толще в условиях**

**больших температурных градиентов** 170

**Ермолов А.А.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Землянов И.В.**

Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова

**Огородов С.А.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова

**Предварительная оценка рисков развития опасных экзогенных**

**процессов в северной части косы Арабатская Стрелка Азовского моря** 175

**Педанов А.А., Сократов С.А.**  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
**Расчет веса снегового покрова на территории России  
как составляющей снеговой нагрузки** 178

**Ушакова Л.А., Сучилин А.А., Воскресенский И.С.**  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
**Сучилина З.А.**  
Институт водных проблем РАН  
**Разработка локальной ГИС особо охраняемых природных территорий  
для оценки «зон риска» проявления опасных рельефообразующих  
процессов** 184

**СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ»**

**Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г.**  
Ухтинский государственный технический университет  
**Федоров А.Н.**  
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН  
**Криогенный рельеф Северной Евразии как источник информации  
о четвертичной истории региона** 195

**Самохвалов Н.Д.**  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
**Васильев А.А.**  
Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН  
**Исследования сезонно-тального слоя в типичной тундре  
Западного Ямала** 203

**СЕКЦИЯ «ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
В ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ»**

**С.А. Перетокин**  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
Красноярский филиал ФГБУ «Федеральный исследовательский центр  
информационных и вычислительных технологий»  
**Завьялов А.Д.**  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
**О необходимости методических рекомендаций по выполнению  
вероятностного анализа сейсмической опасности  
в составе инженерных изысканий** 206

**Смирнов И.Д.**

НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ “Строительство»  
МГУ имени М.В. Ломоносова

**Чуркин А.А.**

НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ “Строительство»

**Применение кластерного анализа для выделения аномалий  
при акустическом обследовании монолитных конструкций**

209

**СЕКЦИЯ «ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
И ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ»**

**Мошин В.Е., Филимонова Е.А., Поздняков С.П.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Геостатистическое моделирование для оценки  
фильтрационной неоднородности**

213

**Парамонов А.Е., Бердичевская Т.А., Кобзев А.Г., Овинников А.Е.**

Филиал АО «Атомэнергопроект» – Санкт-Петербургский  
научно-исследовательский изыскательский институт «Энергоизыскания»

**Патрикеев П.А.**

АО «Атомэнергопроект»

**Разработка экспертной системы оценки рисков проявления  
опасных гидрогеологических процессов и явлений  
с использованием системы QGIS**

220

**Луканов Д.Д., Растворгус И.А., Мухина Л.Н.**

АО «Институт Гидропроект»

**Применение кодов, написанных на языке Python,  
для автоматизированного перестроения модельной сетки  
при решении задач геофильтрации в среде DHI Feflow**

224

**Растворгус И.А., Пиотровский А.С.**

АО «Институт Гидропроект»

**К вопросу моделирования суффозии в нестационарной постановке  
задачи**

232

**СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ НА ШЕЛЬФЕ»**

**Ермолов А.А., Огородов С.А.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Мониторинг динамики берегов и дна замерзающих морей  
как основа обеспечения экологической и геотехнической безопасности  
инженерных объектов**

239

**Рыбалко А.Е.**

ООО «Морской центр»

СПбГУ

ВНИИОкеангеология

**Локтев А.С.**

ООО «ЦМИ МГУ имени М.В. Ломоносова»

**Спасский Я.Б.**

АО «Талтек»

**Абросимов И.В.**

ООО «ЦАСД МГУ имени М.В. Ломоносова»

**Алешин М.И.**

ООО «Сплит»

**Беляев П.Ю., Захаров М.С., Кондратенко А.В., Кудинов А.А.,**

**Щербаков В.А.**

ВНИИОкеангеология

**Токарев М.Ю.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Инженерно-геологические условия Кандалакшского залива**

**и роль геофизических методов в их изучении для целей**

**проектирования объектов морской транспортной инфраструктуры**

243

**Терехина Я.Е., Токарев М.Ю.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Понимаскин А.И.**

ООО «ЦАСД МГУ имени М.В. Ломоносова»

**Яковенко А.Д.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

ООО «ЦАСД МГУ имени М.В. Ломоносова»

**Горбачев С.В.**

ООО «РН-Шельф-Арктика»

**Технологии обработки и анализа 3D сейсмических данных для**

**изучения верхней части геологического разреза Печорского моря**

251

**СЕКЦИЯ «ГЕОТЕХНИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ:  
ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА  
И СОХРАНЕНИЕ ПАМЯТНИКОВ»**

**Евенкова Т.Д., Бурлуцкий С.Б., Лаздовская М.А., Карам Ж.С.**

СПбГУ

**Изменение структуры глинистого грунта под действием токов**

**катодной защиты**

254

**Суслин И.Р., Фоменко И.К.**

РГГРУ имени Серго Орджоникидзе

**Мусаева Л.А.**

АО «Мособлгидропроект»

**Стохастический анализ при оценке устойчивости склона**

260

**Царев М.А.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Экспериментальная оценка устойчивости**

**фильтрационных параметров искусственных грунтов**

269

**СЕКЦИЯ «АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ»**

**Гусаков М.Г., Мешканцев Р.А.**

ООО «Археологические изыскания в строительстве»

**Уникальные археологические находки на территории г. Москвы**

286

**Вязкова О.Е., Гончарова Е.И.**

РГГРУ имени Серго Орджоникидзе

**Проблемы водоснабжения цитадели Нарын-Кала и их решение**

**в историческом прошлом**

293

**Балашов А.Ю., Гусаков М.Г.**

ООО «Археологические изыскания в строительстве»

**Москва как город родилась в X в.?**

299

**Фролов Н.В.**

ООО «Археологические изыскания в строительстве»

**Проблемы и находки на объектах археологических раскопок**

**в г. Москве**

309

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ**

**Бобачев А.А., Миринец А.К.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Электротомографические исследования в транзитной зоне**

316

**Строчков Ю.А.**

ФГБУ «Росгеолфонд»

**Капустин В.В.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Связь атрибутов техногенных вибраций и состояния**

**грунтового массива**

320

**Бобачев А.А., Миринец А.К.**

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Великин С.А.**

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

**Картирование мерзлоты на водных объектах методом**

**электротомографии**

325

## CONTENTS

### SECTION “ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS”

#### **M.P. Kropotkin**

Moscow State (National Research) University of Civil Engineering

#### **I.K. Fomenko**

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

#### **Comparison of probabilistic calculations when analyzing the stability of road embarking slopes using the finite element method**

19

#### **N.F. Petrov, O.V. Nikitina, I.V. Nikonorova**

Ulyanov Chuvash State University

#### **On the role of a single Unified Classification of Landslides in landslide science**

28

#### **S.Yu. Galkin, A.I. Sharafetdinov, A.V. Blazhko, N.G. Volkov**

GEOINGSERVICE LLC

#### **Comparison of efficiency of field and laboratory methods of determining physical-mechanical properties of soils**

33

#### **A.D. Kochev**

Institute “Transprojectengineering” LLC

#### **Information about karst-suffusion funnels in Moscow**

47

#### **M.S. Nikitin, E.A. Sentsova**

Lomonosov Moscow State University

#### **E.A. Voznesensky**

Lomonosov Moscow State University

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences

#### **Methodological aspects of area correction of specimen in triaxial tests of clayey soils**

58

### SECTION “ENGINEERING-GEODESIC SURVEYS”

#### **V.A. Avdeev, L.I. Yablonskiy**

Scientific Geoinformation Center, Russian Academy of Sciences

#### **Possible prospects for the development of technical regulation of engineering-geodesic surveys in construction**

63

#### **D.N. Volegzhannin**

Siberian Branch of the Main Department of State Expertise

#### **On the use of innovative technologies during engineering-geodesic surveys**

71

#### **D.A. Kukushkin, V.P. Galakhov**

Geostryizyskaniya LLC

#### **Actuality and prospects of using advanced technologies in GNSS receivers and mobile laser scanners for engineering-geodesic surveys**

75

<b>E.A. Smirnov, V.E. Dmitriev, A.A. Rumiantseva, I.A. Chibunichev</b> Moscow State University of Geodesy and Cartography <b>Creation and evaluation of the accuracy of the DTM, based on the materials of airborne laser scanning and photogrammetric method</b>	83
<b>V.V. Veselov</b> Atomenergoproekt JSC <b>On errors in estimating the parameters of deformations of buildings by geodetic methods</b>	90
<b>D.A. Kochneva, F.D. Gavril'yuk, T.N. Skrypitsyna</b> Moscow State University of Geodesy and Cartography <b>Modelling of partially destroyed architectural objects based on the materials of ground and aerial photography and amateur images</b>	98
<b>V.M. Kurkov, A.S. Kiseleva</b> Moscow State University of Geodesy and Cartography <b>Training and retraining of personnel in the direction of “Unmanned aerial photography, air laser scanning and photogrammetry” at the Moscow State University of Geodesy and Cartography</b>	106
<b>SECTION “ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS”</b>	
<b>V.I. Sturman</b> Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications <b>Problem of negative result at engineering-ecological surveys and the possibilityes of its decision</b>	115
<b>E.S. Kurbatova, D.V. Zhukov</b> Gazprom morskie proekty LLC <b>Algorithm of engineering-ecological surveys. The problems and the keys to their solutions</b>	121
<b>V.A. Obatnin</b> Saint Petersburg Branch of Gazprom proektirovanie LLC <b>Creation of the database on background concentrations of heavy metals and arsenic in soils</b>	126
<b>M.A. Mitrofanova, I.I. Kosinova</b> Voronezh State University <b>New approaches to soil assessment when conducting engineering-ecological surveys in the Arctic zone</b>	134
<b>A.A. Kuzikov, O.A. Sushchenko</b> NIPIGAS JSC <b>On the issue of organizing the approach to conducting research of radon hazards and gas geochemical studies of soils of industrial facilities during engineering-ecological surveys for the development of design documentation and proposals for SP 502.1325800.2021 regulations correction</b>	139

**SECTION “ENGINEERING-HYDROMETEOROLOGICAL SURVEYS”**

**S.D. Degtyarev, B.F. Perevoznikov, V.G. Palmov**

Institute Giprostroimost OJSC

**M.A. Samokhin**

Institute Giprostroimost OJSC

Lomonosov Moscow State University

**Assessment of maximum water discharges from non-capital dam breaks  
in engineering-hydrometeorological surveys of transport structures**

148

**I.V. Malneva, M.D. Dokukin, A.R. Akaev, M.M. Khadzhiev**

High-Mountain Geophysical Institute

**M.A. Anaev**

Main Directorate of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence,  
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters  
for the Kabardino-Balkarian Republic

**Conditions for the development of slope processes  
in Kabardino-Balkarian Republic in 2022 and 2023**

159

**U.A. Kislyak, G.A. Rzhanitsyn, D.M. Frolov**

Lomonosov Moscow State University

**Mass transfer in snow under high temperature gradients**

170

**A.A. Ermolov**

Lomonosov Moscow State University

**I.V. Zemlianov**

Zubov State Oceanographic Institute

**S.A. Ogorodov**

Lomonosov Moscow State University

Zubov State Oceanographic Institute

**Preliminary assessment of the risks of dangerous geological processes  
and hydrometeorological phenomena in the northern part  
of the Arabatskaya Strelka spit of the Azov Sea**

175

**A.A. Pedanov, S.A. Sokratov**

Lomonosov Moscow State University

**Estimation of the ground snow load on the territory  
of Russia as a component of roof snow load**

178

**L.A. Ushakova, A.A. Suchilin, I.S. Voskresensky**

Lomonosov Moscow State University

**Z.A. Suchilina**

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences

**Development of a local GIS of specially protected natural areas for assessing  
“risk zones” of hazardous relief forming processes**

184

**SECTION “ENGINEERING AND GEOLOGICAL SUPPORT  
FOR CONSTRUCTION OF OBJECTS IN CRYOLITHOZONE”**

**N.A. Shpolyanskaya, G.G. Osadchaya**

Ukhta State Technical University

**A.N. Fedorov**

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

**Cryogenic relief of Northern Eurasia as a source of information  
about the Quaternary history of the region**

195

**N.D. Samokhvalov**

Lomonosov Moscow State University

**A.A. Vasiliev**

Institute of the Earth Cryosphere, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

**Studies of the active layer in the typical tundra of Western Yamal**

203

**SECTION “GEOPHYSICAL METHODS IN ENGINEERING SURVEYS”**

**S.A. Peretokin,**

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies

**A.D. Zavyalov**

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

**On the need for methodological recommendations for the performance  
of probabilistic seismic hazard analyses as part of engineering surveys**

206

**I.D. Smirnov**

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP),  
Research Center of Construction JSC

Lomonosov Moscow State University

**A.A. Churkin**

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP),  
Research Center of Construction JSC

**Application of cluster analysis to identify anomalies during acoustic  
inspection of monolithic structures**

209

**SECTION “HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS  
AS A PART OF ENGINEERING-GEOLOGICAL  
AND ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS”**

**V.E. Moshin, E.A. Filimonova, S.P. Pozdnyakov**

Lomonosov Moscow State University

**Geostatistical modelling for estimation of permeability heterogeneity**

213

<b>A.E. Paramonov, T.A. Berdichevskaya, A.G. Kobzev, A.E. Ovinnikov</b> Branch of Atomenergoproekt JSC – Saint Petersburg Research and Survey Institute “Energoizyskaniya”	
<b>P.A. Patrikeev</b> Atomenergoproekt JSC	
<b>Development of an expert system for risk assessment of dangerous hydrogeological processes and phenomena using QGIS system</b>	220
<b>D.D. Lukanov, I.A. Rastorguev, L.N. Muhina</b> Institute Hydroproject JSC	
<b>Application of codes for dynamic adaptation of a grid model in solving problems of drawdown in the DHI Feflow software</b>	224
<b>I.A. Rastorguev, A.S. Piotrovsky</b> Institute Hydroproject JSC	
<b>On the issue of modelling suffosion in a non-stationary formulation of the problem</b>	232
<b>SECTION “OFFSHORE ENGINEERING SURVEYS”</b>	
<b>A.A. Ermolov, S.A. Ogorodov</b> Lomonosov Moscow State University	
<b>Monitoring the dynamics of the shores and bottom of the freezing seas as a basis for ensuring environmental and geotechnical safety of engineering facilities</b>	239
<b>A.E. Rybalko</b> Marine Center LLC	
Saint Petersburg State University	
VNIIOkeangeologia	
<b>A.S. Loktev</b> Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC	
<b>Ya.B. Spassky</b> Taltek JSC	
<b>I.V. Abrosimov</b> Lomonosov Moscow State University Seismic Data Analysis Center LLC	
<b>M.I. Aleshin</b> Split LLC	
<b>P.Yu. Belyaev, M.S. Zakharov, A.V. Kondratenko, A.A. Kudinov, V.A. Shcherbakov</b> VNIIOkeangeologia	
<b>M.Yu. Tokarev</b> Lomonosov Moscow State University	
<b>Engineering-geological conditions of the Kandalaksh Bay and the role of geophysical methods in their study for the purposes of designing marine transport infrastructure facilities</b>	243

**Ya.E. Terekhina, M.Yu. Tokarev**

Lomonosov Moscow State University

**A.I. Ponimaskin**

Lomonosov Moscow State University Seismic Data Analysis Center LLC

**A.D. Iakovenko**

Lomonosov Moscow State University

Lomonosov Moscow State University Seismic Data Analysis Center LLC

**S.V. Gorbachev**

RN-Shelf-Arctic LLC

**3D seismic data analysis technologies for studying the upper part  
of the geological section in the Arctic shelf shallow areas**

251

**SECTION “GEOTECHNICS AND ENGINEERING GEOLOGY:  
EXPLORATION OF UNDERGROUND SPACE AND PRESERVATION  
OF MONUMENTS”**

**T.D. Evenkova, S.B. Burlutskiy, M.A. Lazdovskaya, Zh.S. Karam**

Saint Petersburg State University

**Changes in the structure of clay soil under the influence of cathodic  
protection currents**

254

**I.R. Suslin, I.K. Fomenko**

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

**L.A. Musaeva**

Mosoblydroproject JSC

**Stochastic analysis in assessing slope stability**

260

**M.A. Tsarev**

Lomonosov Moscow State University

**Experimental assessment of filtration parameters stability for artificial soils**

269

**SECTION “ARCHAEOLOGICAL RESEARCH  
AS A PART OF ENGINEERING SURVEYS”**

**M.G. Gusakov, R.A. Meshkantsev**

Archaeological Surveys in Construction LLC

**Unique archaeological finds on the territory of Moscow**

286

**O.E. Vyazkova, E.I. Goncharova**

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

**Water supply problems of the Naryn-Kala citadel and their solution  
in the historical past**

293

**A.Yu. Balashov, M.G. Gusakov**

Archaeological Surveys in Construction LLC

**Moscow how was the city born in the 10th century?**

299

**N.V. Frolov**

Archaeological Surveys in Construction LLC

**Problems and finds at archaeological excavation sites in Moscow**

309

**ADDITIONAL MATERIALS**

**A.A. Bobachev, A.K. Mirinets**

Lomonosov Moscow State University

**Electrical resistivity tomography in transit zone**

316

**Yu.A. Strochkov**

Russian Federal Geological Fund

**V.V. Kapustin**

Lomonosov Moscow State University

**Relationship of attributes of technogenic vibrations and the state  
of the soil massif**

320

**A.A. Bobachev, A.K. Mirinets1**

Lomonosov Moscow State University

**A.S. Velikin**

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

**Mapping of permafrost on hydraulic structures using electrical resistivity  
tomography**

325

## СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

**Кропоткин М.П.<sup>1</sup>, Фоменко И.К.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>НИУ МГСУ, Институт гидротехнического и энергетического строительства,  
кафедра инженерных изысканий и геоэкологии, г. Москва, singeos@yandex.ru

<sup>2</sup>РГГРУ имени Серго Орджоникидзе, гидрогеологический факультет, кафедра инженерной геологии,  
г. Москва, ifolga@gmail.com

### СРАВНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ АНАЛИЗЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Аннотация.** Вероятностные методы являются необходимым инструментом при оценке рисков и анализе надежности геотехнических систем. Несмотря на то, что в существующих вариантах они способны учитывать приближенно лишь изменчивость грунтов и неопределенность их свойств, вероятностные методы оценки устойчивости склонов в ряде случаев предпочтительнее детерминированных методов для геотехнического анализа. Несколько вероятностных методов, включая метод точечной оценки (PEM), метод Монте-Карло (MCM) и метод случайных конечных элементов (RFEM), могут быть объединены с методом конечных элементов. RFEM отличается тем, что учитывает эффекты пространственной изменчивости, включая расстояние (длину) корреляции. Это является одной из причин различий в оценке вероятности обрушения, рассчитанной на основе RFEM, в сравнении с более традиционными вероятностными методами. В данном исследовании выполнено сравнение методов MCM, PEM и RFEM на примере оценки устойчивости откосов дорожной насыпи, в основании которой залегают сильноизменчивые и частично слабые грунты. Осредненный коэффициент устойчивости составил 1,21–1,27. При этом расчет с использованием метода случайных полей RFEM показал реальную возможность обрушения насыпи – вероятность этого составляет около 2%. Выполненные расчеты показали принципиальную возможность количественной оценки надежности рассматриваемой геотехнической системы на основе стохастического подхода.

**Ключевые слова:** неопределенность; метод конечных элементов; вероятность; устойчивость склона; надежность.

#### *Введение*

Моделирование процессов самой разной природы сталкивается, как правило, с проблемой приблизительности, неточности и неполноты данных о моделируемой системе, т.е. с ее неопределенностью.

Вопрос обеспечения надежности зданий и сооружений, работоспособности их элементов – один из наиболее актуальных вопросов в практике проектирования и строительства геотехнических объектов.

Основные постулаты теории надежности в геотехнике можно формулировать следующим образом:

1. Абсолютная надежность геотехнических систем является недостижимой целью.

2. Методологическая база по разработке системы оценок и количественных методов надежности проектируемых сооружений должна базироваться на стохастическом подходе [11].

Вместе с тем, используемые в практике традиционные подходы к количественной оценке устойчивости склоновых массивов ориентированы в первую очередь на определение коэффициента устойчивости  $K_{уст}$ , а также положения либо потенциальной поверхности разрушения, либо сформировавшейся зоны смещения. Получаемые при этом значения коэффициента устойчивости (коэффициента запаса или коэффициента безопасности – SF) отражают состояние склонового массива только на момент, когда инженерно-геологические условия массива характеризуются показателями, принятыми в качестве исходных. При этом предполагается, что прочностные характеристики грунтов, являются неизменными и однородными в пределах выделенных инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (расчетных геологических элементов – РГЭ). Традиционно, получаемые при количественной оценке устойчивости детерминированные значения  $K_{уст}$  рассматриваются в качестве критерия степени опасности развития оползневых смещений. Именно этот подход закреплен в действующих в нашей стране нормативных технических документах. Очевидно, что описанный «традиционный» подход не обеспечивает получение оценок вероятности (или частоты) развития/активизации оползневых процессов. В то же время, на развитие процессов и формирование инженерно-геологических условий оказывают широкое воздействие различные случайные факторы, т.к. геологические процессы не являются полностью детерминированными.

Целью выполненного исследования являлось сравнение вероятностных численных методов при оценке устойчивости склона.

Для ее достижения были использованы следующие подходы:

- метод точечной оценки (РЕМ);
- метод Монте-Карло (МСМ);
- случайный метод конечных элементов (RFEM).

### *Материалы и методы*

#### ***Характеристика объекта исследований***

Расчеты выполнялись на примере поперечника строящейся автомобильной дороги в Краснодарском крае. Автомобильная дорога на этом участке запроектирована на насыпи высотой 9,5 м. Насыпь возводится из песка с послойным уплотнением укаткой. Вероятностным образом моделировалась лишь неоднородность грунтов насыпи вследствие возможного использования на отдельных участках песков, отличных от предусмотренных проектом или их некачественного уплотнения. Дополнительно на поверхности дорожного покрытия задавалась максимальная расчетная нагрузка от транспорта, равная 20 кПа.

## **Методы исследований**

Вероятностные расчеты выполнялись с помощью трех различных методик:

- методом точечного приближения;
- методом Монте-Карло [1, 2, 6];
- методом случайных конечных элементов (RFEM).

При использовании методик точечного приближения и методики Монте-Карло, расчет устойчивости выполнялся в программном комплексе RS2, при расчете RFEM – в программном комплексе OPTUM 2G.

### **Метод точечной оценки**

Метод точечной оценки представляет собой упрощенный метод генерации случайных входных величин, основанный на методе точечной оценки Розенблюта. В этом методе для каждой случайной величины делаются две «точечные оценки» при фиксированных значениях одного стандартного отклонения по обе стороны от среднего (среднее + стандартное отклонение, среднее – стандартное отклонение). Анализ методом конечных элементов выполняется для каждой возможной комбинации точечных оценок. В результате получается  $2^m$  решений, где  $m$  – количество задействованных случайных величин.

Расчет методом конечных элементов выполняется независимо для каждой возможной комбинации точечных оценок случайных величин. Кроме того, для каждой комбинации производится расчет с использованием средних значений всех параметров (т.е. аналогично детерминированному расчету методом конечных элементов).

Данные расчеты выполнялись в предположении нормального закона распределения удельного сцепления и угла внутреннего трения.

### **Метод Монте-Карло**

Метод Монте-Карло позволяет получать решение математических или физических задач на основе моделирования и получения статистических оценок с использованием различных методов генерации случайных чисел. Исходными параметрами в данном случае являются не скалярные величины, а функции вероятностного распределения свойств грунтов.

Главной проблемой при построении вероятностной модели является определение закона распределения случайных величин. В случае нормального распределения для построения вероятностной функции необходимы два параметра – математическое ожидание и дисперсия.

Результатом решения является вероятностная функция распределения  $K_y$ , на основе которой можно определить вероятность развития оползневого процесса [7].

Для метода Монте-Карло вводится количество значений, которые будут сгенерированы для каждой случайной величины. В данном случае в соответствии с их статистическим распределением было сгенерировано 500 пар

значений удельного сцепления и угла внутреннего трения. Далее методом конечных элементов выполнено соответственно 500 расчетов и получено 500 наборов выходных результатов, которые подверглись статистической обработке.

### ***Рандомизированный метод конечных элементов***

RFEM – это относительно новый метод вероятностного анализа устойчивости склонов, в котором используется комбинация двумерной теории случайных полей и метода конечных элементов.

Пространственная изменчивость свойств грунта при использовании данного подхода моделируется с помощью теории случайных полей [12], согласно которой в любой области ИГЭ (РГЭ) свойства грунта являются случайной переменной, характеризующейся вероятностной функцией распределения и коррелирующей со значениями свойств грунта в смежных областях [8]. Она определяется на основе функции автокорреляции, которая может быть оценена по результатам измерений параметра по итогам проведения полевых или лабораторных испытаний в различных точках массива и вычислена с помощью функции коэффициента корреляции Маркова:

$$R(\tau_x, \tau_y) = \exp\left\{-\sqrt{\sqrt{\left(\frac{2\tau_x}{\theta_x}\right)^2 + \left(\frac{2\tau_y}{\theta_y}\right)^2}}\right\}, \quad (1)$$

где  $R(\tau_x, \tau_y)$  – коэффициент автокорреляции;  $\tau_x$  и  $\tau_y$  – абсолютные расстояния между двумя точками в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно;  $\theta_x$  и  $\theta_y$  – корреляционные расстояния в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

В данном исследовании, для грунтов насыпи, на основе информации о технологии отсыпки и уплотнения, была задана величина корреляционного расстояния в горизонтальном направлении 10 м, в вертикальном направлении 1 м. Коэффициент вариации принимался – по углу внутреннего трения – 10%, по удельному сцеплению – 30%. В грунтах, подстилающих насыпь, расчеты выполнялись на основе детерминированных характеристик.

### *Результаты и обсуждение*

В качестве показателя надежности логично использовать индекс надежности RI, который является мерой нормализации коэффициента устойчивости склона на стандартное отклонение  $K_{уст}$  [10]:

$$RI = \frac{K_{уст} - 1,0}{\sigma_K}, \quad (2)$$

где  $\sigma_K$  – среднеквадратическое отклонение коэффициента устойчивости склона  $K_{уст}$ .

Данный показатель позволяет подойти к оценке устойчивости склонов с позиций теории надежности.

Нормирование надежности может быть выполнено на основе вероятности обрушения склона и индекса надежности RI (рис. 1).

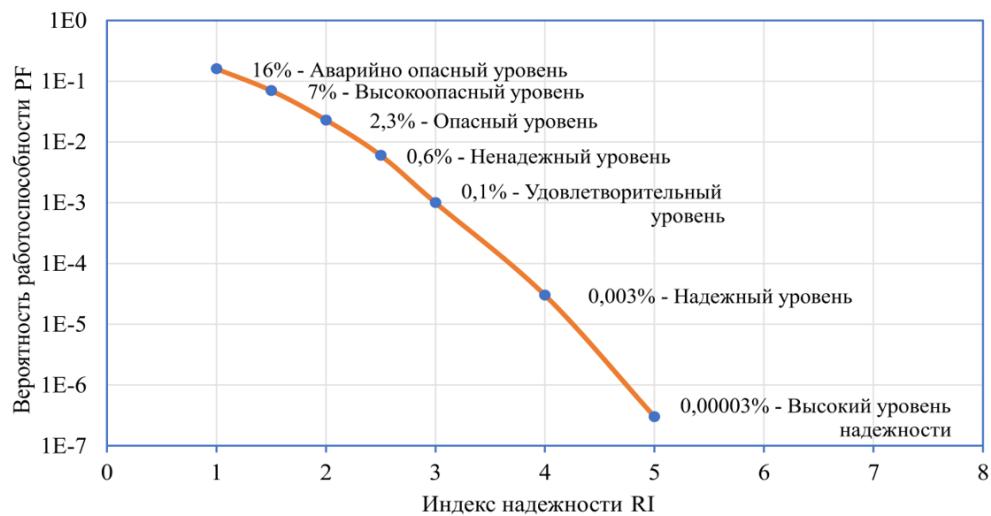


Рис. 1. Уровни надежности [9]

Итоговая геомеханическая схема с результатами вероятностного расчета методом точечного приближения представлена на рис. 2.

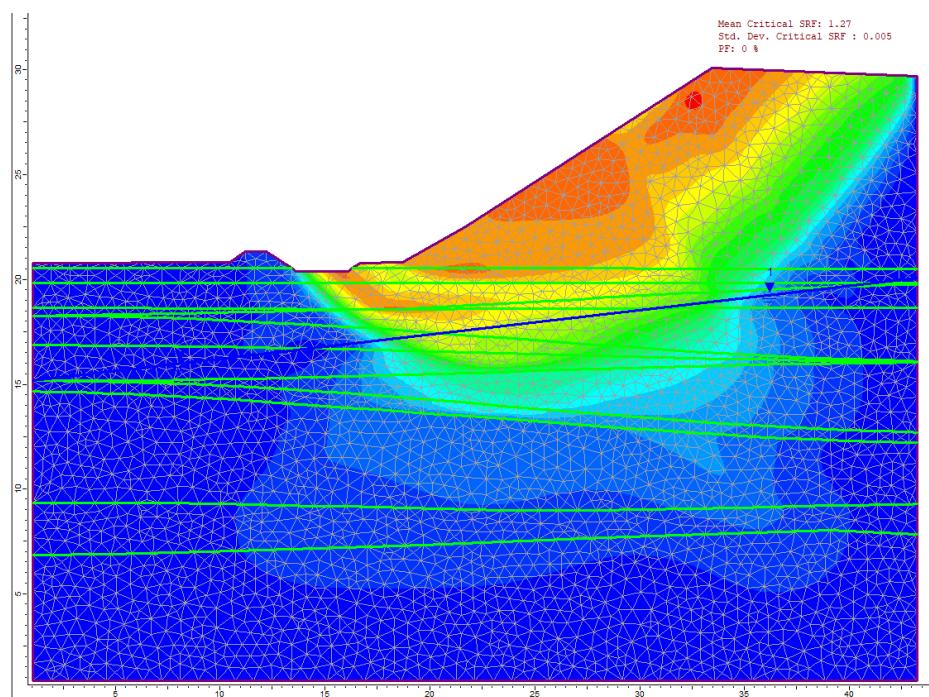


Рис. 2. Геомеханическая схема с результатами вероятностного расчета методом точечного приближения. Цветом показаны общие перемещения

При среднем  $K_{уст} = 1,27$ , вероятность развития оползневого процесса  $P = 0\%$ , т.е. склон является устойчивым с высоким уровнем надежности.

Средний  $K_{уст} = 1,24$ , а вероятность развития оползневого процесса  $P = 0,3\%$ , т.е. склон является устойчивым с удовлетворительным уровнем надежности (рис. 3, 4).

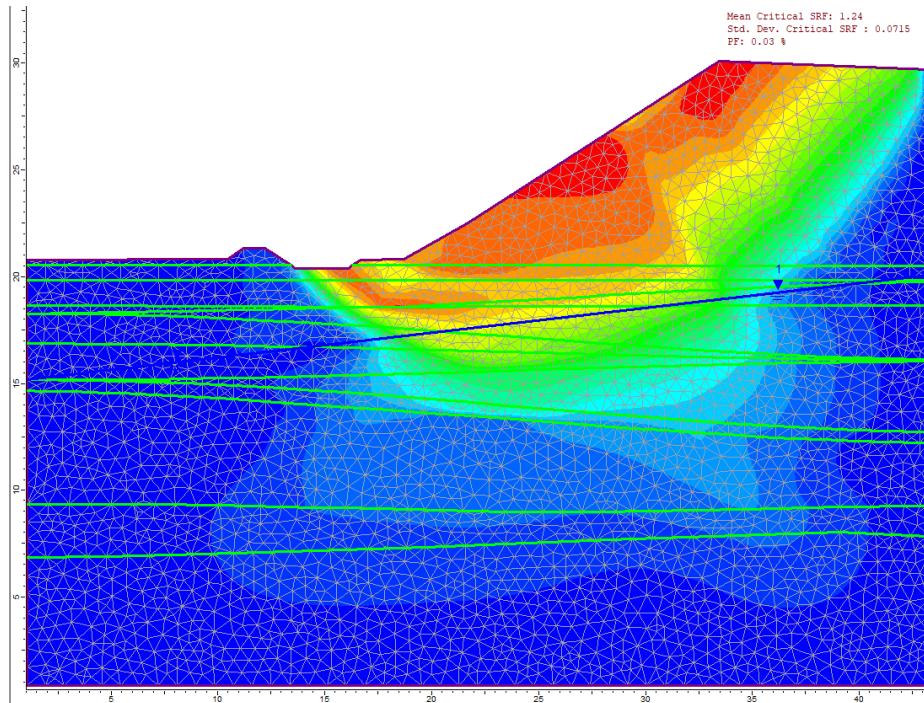


Рис. 3. Геомеханическая схема с результатами вероятностного расчета методом Монте-Карло. Цветом показаны общие перемещения

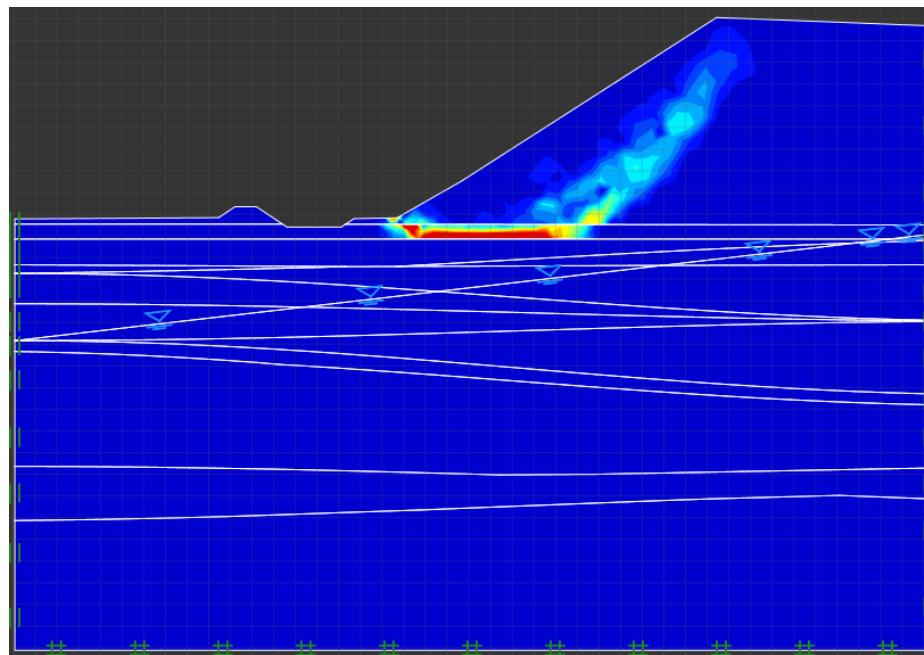


Рис. 4. Геомеханическая схема с результатами вероятностного расчета методом RFEM

Вероятностные расчеты устойчивости модельного склона с использованием трех различных методов показали хорошую сходимость коэффициентов устойчивости, но различные расчетные уровни надежности (табл.).

Таблица  
Результаты расчетов по всем методикам

Метод	Среднее значение $K_{уст}$	Стандартное отклонение $\sigma$	Уровень надежности	Вероятность отказа, %
Точечной оценки приближения	1,27	0,00500	Высокий	0
Монте-Карло	1,24	0,07150	Удовлетворительный	0,3
RFEM	1,21	0,07785	Ненадежный	1,8

Выполненные расчеты показывают принципиальную возможность количественной оценки надежности геотехнических систем. При сравнительно высоком запасе надежности, согласно средним значениям  $K_{уст}$ , учет возможной неоднородности свойств даже только грунтов насыпи, требует считать ее не вполне надежной.

Использование детерминированного подхода не позволяет оценивать риски, связанные с неопределенностью закладываемых в расчет параметров и конечный результат расчетов может оказаться неоправданно оптимистичным.

Данные расчеты являются наглядным примером возможности практической реализации вероятностных методов в инженерной геологии и геотехнике.

Существующая методология расчетов, основанная на детерминистическом подходе, должна в конечном итоге трансформироваться в концепцию применения вероятностных подходов в геотехнике. Стохастическая методология оценки устойчивости и расчета надежности позволяет оценивать уровень неопределенности с последующим его снижением через выявление основных факторов, обуславливающих неопределенность, и выполнение количественного и качественного анализа рисков [3–5].

### Список литературы

1. Биндер К., Хеерман Д.В. Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике. М.: Физматлит, 1995. 141 с.
2. Жданов Э.Р., Маликов Р.Ф., Хисматуллин Р.К. Компьютерное моделирование физических явлений и процессов методом Монте-Карло. Уфа: Изд-во БГПУ, 2005. 124 с.

3. Кропоткин М.П. Вероятностно-детерминированные расчеты устойчивости склонов и откосов // Материалы международной конференции «Анализ и оценка природных рисков в строительстве». М., 1997. С. 29–31.
4. Кропоткин М.П., Корбутяк П.В. Автоматизированные методы расчетов устойчивости склонов и откосов // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного Совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ГЕОС, 2001. Вып. 3. С. 376–379.
5. Кургузов К.В., Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Вероятностно-статистические подходы при оценке неопределенности литотехнических систем // Геоэкология. 2020. № 2. С. 80–89.
6. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. М.: Академия, 2006. 366 с.
7. Схематизация свойств грунтов при математическом моделировании в инженерной геологии и геотехнике / И.К. Фоменко, К.В. Кургузов, Д.Н. Горобцов, М.А. Новгородова, О.Н. Сироткина // Независимый электронный журнал «ГеоИнфо». 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geoinfo.ru/product/fomenko-igor-konstantinovich/skhematizaciya-svojstv-gruntov-pri-matematicheskem-modelirovaniyu-v-inzhenernoj-geologii-i-geotekhnike-44659.shtml> (дата обращения: 26.11.2023).
8. El-Ramly H., Morgenstern N., Cruden D. Probabilistic slope stability analysis for practice // Canadian Geotechnical Journal. 2002. Vol. 39. No. 3. P. 665–683. <https://doi.org/10.1139/t02-034>.
9. Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering. Washington, DC, USA: United States Army Corps of Engineers, 1997. 15 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://archive.org/details/DTIC ADA403281>/mode/2up (дата обращения: 26.11.2023).
10. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. An engineering methodology, 1<sup>st</sup> edition, revision 1. Calgary, Canada: GEO-SLOPE International Ltd., 2004. 396 p.
11. Phoon K.-K. Reliability-based design in geotechnical engineering. London, UK and New-York, NY, USA: Taylor and Francis, 2008. 544 p.
12. Vanmarcke E. Random fields: analysis and synthesis. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1983. 382 p.

**M.P. Kropotkin<sup>1</sup>, I.K. Fomenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, singeos@yandex.ru

<sup>2</sup>Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, ifolga@gmail.com

## **COMPARISON OF PROBABILISTIC CALCULATIONS WHEN ANALYZING THE STABILITY OF ROAD EMBARKING SLOPES USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

**Abstract.** Probabilistic methods are an essential tool in risk assessment and reliability analysis of geotechnical systems. Despite the fact that in existing versions they are able to approximately take into account only the variability of soils and the uncertainty of their properties, probabilistic methods for assessing slope stability are in some cases preferable to deterministic methods for geotechnical analysis. Several probabilistic methods, including the point estimation method (PEM), the Monte Carlo method (MCM), and the random finite element method (RFEM), can be combined with the finite element method. RFEM differs in that it takes into account the effects of spatial variability, including correlation distance (length). This is one of the reasons for the differences in collapse probability estimates calculated from RFEM compared to more traditional probabilistic methods. This study compares the MCM, PEM, and RFEM methods using the example of assessing the stability of slopes of a road embankment, which is based on highly variable and partially weak soils. The average stability factor was 1.21–1.27. At the same time, calculations using the RFEM random field method showed the real possibility of embankment collapse – the probability of this is about 2%. The calculations performed showed the fundamental possibility of quantitatively assessing the reliability of the geotechnical system under consideration based on a stochastic approach.

**Key words:** uncertainty; finite element method; probability; slope stability; reliability.

**Петров Н.Ф., Никитина О.В., Никонорова И.В.**

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, историко-географический факультет,  
кафедра физической географии и геоморфологии, г. Чебоксары, petrovnf@gmail.com

## **О РОЛИ ЕДИНОЙ УНИФИЦИРОВАННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ОПОЛЗНЕЙ В ОПОЛЗНЕВЕДЕНИИ**

**Аннотация.** Обращено внимание на актуальность разработок Единой унифицированной классификации оползней (ЕУКО) в оползневедении и на снижение интереса к этой проблеме. Предлагается вариант создания ЕУКО путем синтеза 4–5 классификаций по механизму, отнесенных И.О. Тихвинским к «наиболее полным», присоединив к ним классификации И.О. Тихвинского (2002 г.) и Крудена – Варнса (1996 г.). Предложены новые определения основных понятий оползневедения: оползень, оползневой процесс, оползневой механизм. В новое определение оползня включены признаки: отделение, стенка срыва, материальная связь со средой, в пределах ложа.

**Ключевые слова:** Единая унифицированная классификация оползней (ЕУКО); номенклатурные таксоны; уровни организации оползневых тел; естественные таксоны оползней; объект и предмет оползневых систем; сущностные признаки; расчетные модели.

Публикация вызвана необходимостью обратить внимание на причины резкого ухудшения в последние годы в отечественном оползневедении отношения к проблеме Единой унифицированной классификации оползней (ЕУКО) (принципы отношения к проблеме ЕУКО за рубежом иные и заслуживают отдельного рассмотрения), к ее статусу и роли в теории и практике оползневедения, а именно: если в прошлом столетии вопросы классификации оползней, стремление понять их предназначение и структуру оставались приоритетными [2, 4–6, 8, 12], то в начале этого века, судя по таким солидным научным отечественным публикациям [1, 3, 7, 9, 10], о данном понятии стараются не вспоминать. Здесь ЕУКО – это единая унифицированная классификация оползней, т.е. система логически соподчиненных и иерархически взаимосвязанных естественных номенклатурных (как от класса к типу и виду в грунтоведении, например) таксонов оползней определенных уровней организации. Такая схема, после одобрения и принятия сообществом оползневедов той или иной страны, как это случилось в США, или в англо-саксонской группе стран, становится в этой стране (в странах) почти нормативным документом в изучении, распознавании (идентификации) таксонов оползней в полевых условиях, анализа механизма функционирования оползневых систем, составления их расчетных моделей, выполнения и анализа результатов расчетов и проектирования рационального состава противооползневых мероприятий. Такая схема должна соответствовать принципам естественной таксономии природных тел, не должна иметь логических ошибок. Судя по монографии [8], в XX в. российское оползневедение не обнаружило подобной схемы среди имеющихся более сотни ее представителей или ее не замечало, теперь же, по данным [1, 7, 9], возможно и

не видит в ней особой необходимости. В принципе, оползневедческое сообщество ее не замечало и вполне обходилось без нее задолго до появления монографии Е.П. Емельяновой (1972 г.) с упоминанием об ЕУКО. Обходится оно и теперь [9] не только без ЕУКО, но и фактически без научных определений таких основных понятий *оползневедения*, как его *объект* (что такое оползень и оползневой процесс?) и *предмет* (оползневой механизм?), без которых в принципе невозможна и сама корректная их классификация, что и подтверждается жизнью.

В свете сказанного, вопрос «Нужна ли Единая унифицированная классификация оползней (ЕУКО) современному оползневедению в 2023 г.»? не представляется праздным. Действительно, многим изыскателям может показаться, что, если до сих пор наша наука и практика оползневедения обходились без него (зарубежные – давно приняли как бы за ЕУКО грунтово-механический вариант схемы Варнса (1978, рис. 2.1), а затем и Крудена – Варнса (1996), не обсуждая другие), то нужна ли она вообще? По этому вопросу мы придерживаемся мнения [4–6], что одновременное сосуществование множества даже «правильных», по В.В. Кюнцелю [2, С. 102–113], классификаций равносильно отсутствию их. По мнению И.О. Тихвинского [7, С. 266], наиболее полные классификации опубликованы М.К. Рзаевой (1969), К.А. Гулакяном и В.В. Кюнцелем (1970), Г.С. Золотаревым (1983), Н.Ф. Петровым (1987). В данный список следует заслуженно добавить и схему типизации оползней И.О. Тихвинского [7, табл. 4.2], схему Крудена – Варнса (1996) и среди этих схем следует искать или из них создать будущий коллективный ЕУКО. Взятые порознь, они все неполные, а вместе включают все известные типы простых оползней – кирпичиков здания будущего ЕУКО. Поэтому ЕУКО, безусловно, нужна, но ее создание связано и с уточнением определений ряда приведенных ниже понятий как *оползень*, *оползневой процесс*, *оползневой механизм*, опубликованных, в т.ч. и авторами в 1980-е гг. в процессе разработки ЕУКО и незначительно отредактированных в настоящее время. Следует заметить, что популярное определение Е.П. Емельяновой («смещение... без потери контакта...») отличает оползни только от обвала, осипей и осова, но не отличает от множества других процессов и явлений: поверхностной и глубинной ползучести, крипа и десерпции, даже от солифлюкции, курума, изгиба голов пластов и опрокидывания (topples).

*Оползневой процесс* – процесс отделения (*отрыва*) от склонового (откосного) массива его части или частей, их смещения в *пределах ложа*, образуя *стенку срыва* и *сохраняя материальную связь* со средой своего образования. Здесь признак «*сохранение материальной связи* со средой своего образования» (вместо «без потери контакта») отличает оползни от обвалов и осипей, признак «*наличие стенки срыва*» отличает оползни от крипа, десерпции, курума, солифлюкции и др., а признак «*в пределах ложа*» позволяет отличать оползни от «каменных лавин», «оползней-обвалов» [10, 11],

функционирующих уже за пределами ложа, подчиняясь геолого-геоморфологическим, гидрологическим особенностям только зоны транзита.

*Оползень (объект оползневедения)* – специфическое геологическое горнорудное (грунтовое) тело или система тел *оползневого происхождения* с определенными структурными, функционально-динамическими и другими свойствами и отношениями. Вне авторских работ в определении «оползневого процесса» до сих пор господствует понятие «движение по поверхности смещения без потери контакта» с ложем, хотя давно доказано, что этого признака для оползней явно недостаточно, т.к. аналогично движутся и десерпция, и крип, и даже курум, если отвлечься от их скоростей. Поэтому к определению оползня авторами добавлены такие дополнительные признаки как «отрыв», «образование стенки срыва», «смещение в пределах ложа», а вместо фразы «движение без потери контакта с ложем, с основанием» предложено словосочетание «сохранение материальной связи со средой своего образования», т.к. при оползневом процессе в горно-геологическом массиве у оползневого тела сохраняются связи не только с ложем, но и с такими компонентами среды, как гидрогеологические, тектонические, геоморфологические и др. Но в СП 420.1325800.2018 [10] сохранена старая редакция понятия «оползневой процесс». Теперь об оползневом механизме.

*Оползневой механизм (предмет оползневедения)* – представлен оползневым телом или системой оползневых тел, взаимодействующих между собой путем соприкосновения и совершающих определенные движения друг относительно друга и неподвижного ложа. Оползневой механизм – структурно-функциональная модель, конструкция фактического оползня с познанной структурой, его сущность. Прежде понятие «оползневой механизм» определялся абстрактно – как движение геосистемы (разумеется, и оползня), как «последовательная смена ее (его) состояний» (Е.П. Емельянова, Г.К. Бондарик). Такие общие определения не нацеливают исследователя на познание строения механизма оползневой системы, ее функционирования. А научно обоснованное разнообразие простых и сложных оползневых механизмов в виде конструкций, схем, расчетных моделей и является фактическим материалом ЕУКО. Другими словами, ЕУКО – это ключ к корректным расчетным схемам по оценке устойчивости, к обоснованным противооползневым мероприятиям, к региональным классификациям.

Назначение ЕУКО в оползневедении аналогично назначению классификации минералов в минералогии, классификации магматических пород – в петрографии, осадочных – в литологии, грунтов – в грунтоведении, классификации беспозвоночных – в палеонтологии и др. Причем, принципы таксономии перечисленных костных и биологических объектов, как и оползней, аналогичные: они классифицируются по сущностным признакам, входящим в определение объекта классификации и выражающим его суть, предмет классификации. Авторские представления об основных методологических вопросах таксономии природных объектов изложены в 1987 г. и позднее в

монографиях по таксономии простых и сложных оползней [4–6]. В них же сделана попытка собрать все известные науке таксоны простых и сложных оползней – элементов класса «оползни» в виде механизмов-моделей, определены их номенклатурные места и генетические связи между собой с соблюдением логических правил и принципов естественной таксономии компонентов геосфер (химических элементов, минералов, горных пород и др.) на основе их *собственных сущностных* признаков. По результатам авторских исследований [4–6], такими простыми таксонами являются в четырех группах не менее 12 типов.

Исследования строения сложных оползней только начинаются, и вариант их первой классификации построен путем обобщения понятий и терминов из трудов десятков предшественников [1, 2, 4, 6, 9].

Таким образом, ЕУКО – основа для составления корректных расчетных моделей, т.к. построению такой модели фактического действующего оползня предшествует процедура изучения его строения в полевых условиях (при проведении инженерно-геологических изысканий) как структурированной системы и распознавания ее с позиций принадлежности по механизму (по строению и движению) к одному из таксонов ЕУКО с уже известными особенностями строения и функционирования. Составленная таким образом графическая схема механизма изучаемого оползня и есть основа его расчетной модели. Авторы надеются, что предложенные разработки помогут специалистам на всех стадиях изыскательских работ, начиная с обследования территории и кончая составлением окончательного технического отчета по результатам проведении инженерно-геологических изысканий.

### Список литературы

1. Инженерная геология России. Т. 2. Инженерная геодинамика территории России / Под ред. В.Т. Трофимова и Э.В. Калинина. М.: КДУ, 2013. 816 с.
2. Опасные экзогенные процессы / В.И. Осипов, В.М. Кутепов, В.П. Зверев и др. / Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
3. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД, 2015. 320 с.
4. Петров Н.Ф. Оползневые системы. Сложные оползни. Кишинев: Штиинца, 1988. 226 с.
5. Петров Н.Ф. Характеристика номенклатурных таксонов оползневых систем // Материалы конференции «Эколого-геоморфологические исследования (Арчиковские чтения – 2015)». Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. С. 46–65.
6. Петров Н.Ф., Никонорова И.В., Никитина О.В. Структурное оползневедение: аспекты классификации. Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2017. 218 с.

7. Природные опасности России. Т. 3. Экзогенные геологические опасности / Под. ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко. М.: КРУК, 2002. 348 с.
8. Проблемы классификации склоновых гравитационных процессов / Отв. ред. М.В. Чуринов, Е.А. Толстых. М.: Наука, 1985. 204 с.
9. Склоновые геологические процессы / О.В. Зеркаль, Э.В. Калинин, О.С. Барыкина и др. // Под ред. В.Т. Трофимова, О.В. Зеркаля. М.: Пере, 2022. 724 с.
10. СП 420.1325800.2018 Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования.
11. Стром А.Л. Каменные лавины Центральной Азии: особенности строения, закономерности формирования и катастрофические последствия: авторефер. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: Изд-во МГУ, 2022. 42 с.
12. Тихвинский И.О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988. 144 с.

**N.F. Petrov, O.V. Nikitina, I.V. Nikonorova**

Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, petrovnf@gmail.com

## **ON THE ROLE OF A SINGLE UNIFIED CLASSIFICATION OF LANDSLIDES IN LANDSLIDE SCIENCE**

**Abstract.** Attention is drawn to the relevance of Unified Classification of Landslides (EUKO) developments in landslide science and to the decreasing interest in this problem. An option is proposed for creating EUCO by synthesizing 4–5 classifications by mechanism, assigned by I.O. Tikhvinsky to the “most complete”, adding to them the classifications of I.O. Tikhvinsky (2002) and Cruden – Varnes (1996). New definitions of the basic concepts of landslide science are proposed: landslide, landslide process, landslide mechanism. The new definition of a landslide includes the following features: separation, failure wall, material connection with the environment, within the bed. **Key words:** Unified Classification of Landslides (EUKO); nomenclatural taxa; levels of organization of landslide bodies; natural taxa of landslides; object and subject of landslides systems; essential features; calculation models.

**Галкин С.Ю., Шарафетдинов А.И., Блажко А.В., Волков Н.Г.**

ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», г. Москва, s.galkin@giscept.com, Sharafetdinov.anvar@gmail.com,  
a.blazhko@giscept.com, n.volkov@giscept.com

## **СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛЕВЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ**

**Аннотация.** На примере объекта было проведено сравнение эффективности определения физико-механических свойств грунтов различными полевыми и лабораторными методами. В исследовании были рассмотрены следующие полевые методы: статическое зондирование, испытания дилатометром Маркетти, испытания вращательным срезом (крыльчатка), инженерно-геологическое бурение, испытания прессиометром, испытания штампом и комплекс лабораторных методов, достаточных для расчета по моделям Мора – Кулона и нелинейного механического поведения грунта. Эффективность определения физико-механических свойств грунтов с помощью упомянутых методов была проанализирована путем сравнения затрат на выполнение каждого вида работ, объема и количества данных, полученных с помощью каждого метода, представления первичных данных в цифровой форме, продолжительности выполнения каждого отдельного метода.

**Ключевые слова:** эффективные полевые инженерно-геологические методы; испытания статическим зондированием; испытания дилатометром Маркетти; испытания грунтов на вращательный срез (крыльчатка); инженерно-геологическое бурение с проведением лабораторных работ; испытания грунтов штампом; прессиометрические испытания.

### *Актуальность*

Отрасль инженерных изысканий существует в условиях постоянного ускорения и динамики. Сегодня бизнес стремится в самые сжатые сроки получать качественные готовые решения для поставленных задач. Сравнение эффективности методов получения физико-механических свойств грунтов является главной задачей этой работы.

В качестве примера взят объект, на котором были выполнены различные методы исследования грунтов в ходе проведения дополнительных по заданию заказчика инженерно-геологических изысканий.

Под эффективностью принято считать соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами. В авторском случае:

1) результат:

– объем данных – количество и объем полученных данных о физико-механических свойствах грунта каждым методом;

– цифровой формат первичных данных – возможность получения данных о геологической среде во время проведения испытаний без риска совершения ошибки оператором и с возможностью контроля и просмотра данных в любое время;

2) ресурсы:

- стоимость работ – количество денежных средств, затраченных на проведение каждого полевого и лабораторного метода;
- затраченное время (трудозатраты) – количество затрачиваемого времени на выполнение работ каждым методом.

*Площадка проведения дополнительных инженерно-геологических изысканий*

Площадка исследования расположена в центральной части Западно-Сибирской равнины, в юго-восточной части Ханты-Мансийского автономного округа.

На этапе строительства исследуемого объекта начали развиваться равномерные осадки, которые за один год мониторинга сооружения составили 0,8 м.

Целью работ является получение актуальной информации о геологическом строении и состоянии грунтов на застроенной территории при проведении дополнительных инженерно-геологических изысканий для принятия последующих проектных решений.

Инженерно-геологические изыскания проводились в два этапа. *Первый этап* – проведение полевых исследований грунтов:

- статическим зондированием с измерением порового давления СРТУ;
- дилатометром Маркетти DMT;
- испытания грунтов на вращательный срез (крыльчаткой) VST.

*Второй этап* – проведение полевых и лабораторных исследований грунтов:

- инженерно-геологическое бурение ВН;
- испытания грунта штампом PLT;
- испытания грунта прессиометром РМТ;
- лабораторные работы с определением: 1. физических свойств грунтов; 2. физико-механических свойств грунтов (модель Мора – Кулона); 3. модели нелинейного механического поведения грунта (Soft-Soil и Soft-Soil Creep).

На первом и втором этапах проводилась камеральная обработка данных с написанием отчета.

Точки исследований грунтов располагались по углам сооружения и посередине одной стороны сооружения. На первом этапе также были проведены испытания в центре здания (в подвальном помещении). В каждой точке исследования грунты были испытаны различными инженерно-геологическими методами, расстояние между отдельными методами испытаний не превышало 1,5 м (рис. 1).

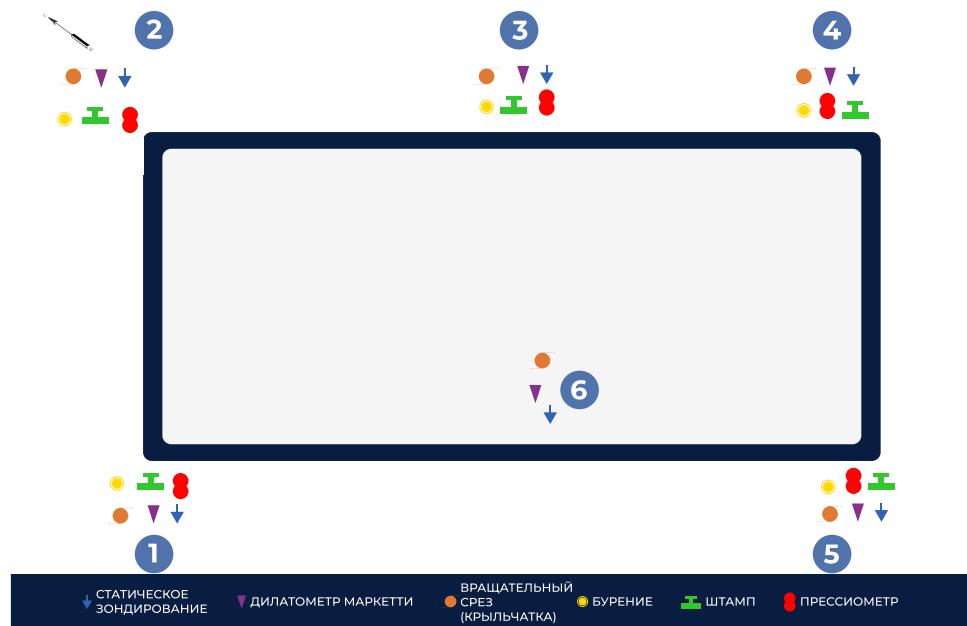


Рис. 1. План расположения точек инженерных испытаний

### *Полевые методы*

#### *Статическое зондирование CPTU*

Работы включали проведение испытаний статическим зондированием в пяти точках, каждая глубиной 30,5 м и одна точка глубиной 48,0 м. Общий объем испытаний составил 200,5 м.

Во время проведения испытаний статическим зондированием, проводились точечные исследования на рассеивание порового давления в грунте (диссипация).

#### *Испытания грунта дилатометром DMT*

Аналогично статическому зондированию, были проведены испытания с использованием дилатометра Маркетти. Исследования проводились в тех же точках и до тех же глубин. Испытания состояли из вдавливания лезвия дилатометра в грунт с последующим определением каждые 25 см начального и конечного давлений ( $P_0$  и  $P$ , кПа) расширения мембранны дилатометра в сторону грунта. Общий объем испытаний составил 200,5 м.

#### *Испытания грунта вращательным срезом VST*

На основе полученных данных по статическому зондированию СРТ и дилатометрическим испытаниям DMT были выделены слои слабых глинистых грунтов с  $q_c < 1,0$  МПа.

Для полевого определения недренированной прочности данных грунтов  $C_u$  были проведены испытания на вращательный срез (крыльчатка). Испытания проводились точечно, до глубины 22 м, всего было произведено 39 испытаний.

Исследования грунтов были осуществлены автоматизированной крыльчаткой.

### *Инженерно-геологическое бурение ВН*

Было проведено бурение инженерно-геологических скважин с отбором образцов в пяти точках, глубина каждой скважины составила 30,5 м. Общий объем бурения 152,5 пог. м.

Бурение производилось ударно-канатным и колонковым способом с частотой отбора образцов песчаных грунтов – 1,0 м, глинистых грунтов – 0,5 м. После завершения бурения каждой скважины, отобранные образцы отправлялись в лабораторию.

### *Испытания грунта штампом РЛТ*

Были проведены 16 испытаний грунтов штампом в пяти различных точках. Для исследования использовался винтовой штамп (тип IV), площадью 600 см<sup>2</sup>. В связи с техническими особенностями проведения штамповых испытаний, работы проводились до глубины 13,5 м.

Испытания проводились по схеме: нагрузка – разгрузка – повторное нагружение.

### *Испытания грунтов прессиометром РМТ*

В связи с тем, что штамповые испытания проводились не на всю исследуемую инженерно-геологическую толщу, в дополнении к ним были проведены прессиометрические испытания.

Были выполнены 24 испытания прессиометром в «быстрым» режиме.

Испытания проводились радиальным прессиометром (диаметр рабочей камеры 90 мм) в песчаных и глинистых грунтах по схеме: нагрузка – разгрузка – повторная нагружение. Глубина испытаний составила от 8,5 до 30,2 м.

На основе обработанных полевых и лабораторных данных были выделены следующие инженерно-геологические элементы (ИГЭ) с получением физико-механических характеристик (табл. 1).

Для расчета физико-механических параметров грунтов по данным статического зондирования СРТ использовалось Приложение Ж СП 446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства» [2].

Дополнительно использовались зарубежные расчетные формулы:

- модуль деформации  $E$  рассчитан по формуле из публикации [3];
- угол внутреннего трения  $\phi'$  рассчитан для песчаных грунтов по формуле из [3]; для глинистых грунтов по формуле, предложенной P.W. Mayne;
- сопротивление недренированному сдвигу  $C_u$  рассчитано по формуле [4].

Средние нормативные значения угла внутреннего трения  $\phi'$ , сопротивления недренированному сдвигу  $C_u$ , сцепления  $c$  и модуля деформации  $E$ , полученные с помощью различных полевых и лабораторных методов, имеют незначительное расхождение.

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
 «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
 г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

Таблица 1

Основные физико-механические характеристики, полученные различными полевыми и лабораторными методами

Параметр	Статическое зондирование		Дилатометр Маркетти	Вращательный срез	Испытания штампом	Прессиометрические испытания	Лабораторные испытания				
	СП 446.1325800.2019	Расчетное по формулам					$E_0$ 0,1–0,2	$E_0$ 0,2–0,4	$E_{moed}$ 0,1–0,2	$E_{moed}$ 0,2–0,4	$E_{moed}$ 0,4–0,6
ИГЭ-1: насыпь – песок мелкий, плотный, неоднородный, средней степени водонасыщения (глубина: 0–7,1 м)											
$E$ , МПа	53,50	54,00	74,50	–	12,00	–	–	–	10,50	22,50	40,00
$\varphi$ , °	36	44	44	–	–	–	36				
ИГЭ-1а: насыпь – песок мелкий, средней плотности, однородный, средней степени водонасыщения (глубина: 0–8,0 м)											
$E$ , МПа	17,30	34,50	47,00	–	17,50	–	–	–	8,75	17,75	33,50
$\varphi$ , °	38	41	41	–	–	–	34				
ИГЭ-2: суглинок легкий, слоистый, мягкотпластичный, с включением остатков органики (глубина: 7,0–14,0 м)											
$E$ , МПа	6,25	6,00	4,25	–	4,50	5,25	7,75	13,75	4,25	7,25	–
$\varphi$ , °	18	18	–	–	–	–	17				
$C_u$ , кПа	–	34	53	63	–	–	61				
$c$ , кПа	16	–	–	–	–	–	20				
ИГЭ-3: песок пылеватый, водонасыщенный, средней плотности (глубина: 12,0–15,6 м)											
$E$ , МПа	25,50	46,50	36,50	–	14,00	–	–	–	7,00	15,00	25,00
$\varphi$ , °	32	38	36	–	–	–	36				

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
 «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
 г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

Параметр	Статическое зондирование		Дилатометр Маркетти	Вращательный срез	Испытания штампом	Прессиометрические испытания	Лабораторные испытания				
	СП 446.1325800.2019	Расчетное по формулам					$E_0$ 0,1–0,2	$E_0$ 0,2–0,4	$E_{moed}$ 0,1–0,2	$E_{moed}$ 0,2–0,4	$E_{moed}$ 0,4–0,6
$E$ , МПа	8,00	8,00	4,50	–	–	4,75	4,75	8,00	3,75	6,25	–
ИГЭ-4: суглинок, слоистый, мягкопластичный, с прослойками суглинка тугопластичного (глубина: 13,6–23,7 м)											
$\varphi$ , °	19	15	–	–	–	–	16				
$C_u$ , кПа	–	66	68	81	–	–	55				
$c$ , кПа	17	–	–	–	–	–	17				
ИГЭ-5: песок мелкий, плотный, водонасыщенный, неоднородный (глубина: 27,8–35,0 м)											
$E$ , МПа	39,50	79,00	65,50	–	–	23,00	–	–	9,00	16,25	33,00
$\varphi$ , °	36	40	34	–	–	–	34				
ИГЭ-5а: песок пылеватый, средней плотности, неоднородный, водонасыщенный (глубина: 23,0–28,5 м)											
$E$ , МПа	23,00	48,00	67,00	–	–	16,50	–	–	5,50	10,00	23,75
$\varphi$ , °	31	35	34	–	–	–	31				

Примечание:  $E$  – модуль общей деформации, МПа;  $\varphi$  – угол внутреннего трения, °;  $C_u$  – сопротивление недренированному сдвигу, кПа;  $c$  – сцепление, кПа.

Значение модулей общей деформации  $E$ , получаемые на основании различных методов испытаний, не могут сопоставляться между собой, т.к. их определение проводится при различных напряженных состояниях, в первую очередь траектории изменения среднего напряжения. Для грунтовых сред это ведет к нелинейному изменению сопротивления объемной и сдвиговой деформации [1].

При проведении геотехнического моделирования целесообразно использовать параметры, определенные различными методами в зависимости от предполагаемой работы грунта в основании [1].

### *Эффективность полевых и лабораторных методов*

#### *Трудозатраты*

На основе времени, затраченного на проведение: полевых, камеральных работ, транспортировку образцов и лабораторные исследования (при необходимости), были рассчитаны трудозатраты в чел.-дн. для каждого выполненного полевого и лабораторного метода (табл. 2).

Таблица 2  
Трудоемкость и длительность разных методов

Сравниваемый параметр	Штамповые испытания	Испытания на вращательный срез	Дилатометр Маркетти	Статическое зондирование	Прессиометрические испытания	Инженерно-геологическое бурение с лабораторными работами
Трудоемкость, чел.-дн.	164	24	18	14	148	194
Длительность, дн.	64	15	10	10	48	155

На основе фактических временных затрат был построен график длительности проведения полевых и лабораторных испытаний (рис. 2).

Исходя из продолжительности работ и трудозатрат в чел.-дн. статическое зондирование СРТ и дилатометрические испытания DMT с обработкой полевых данных и написанием отчета потребовали в 15 раз меньше времени, чем на инженерно-геологическое бурение ВН с проведением лабораторных работ, обработкой данных и написанием отчета, при схожем объеме полевых работ и полученных физико-механических характеристик с помощью данных методов.

На проведение исследований другими полевыми методами было затрачено больше времени и получено меньшее количество физико-механических характеристик, чем при проведении статического зондирования и дилатометрических испытаний.

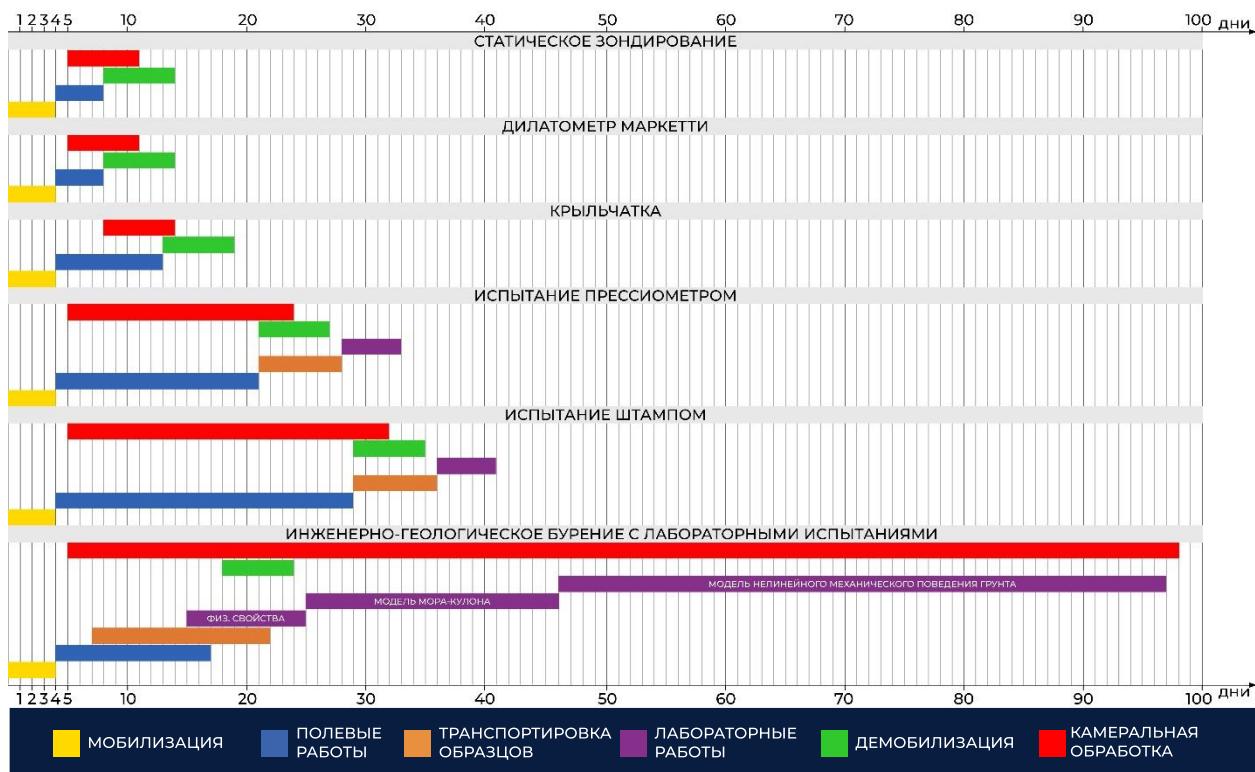


Рис. 2. Длительность проведения испытаний, дн.

## *Стоимость проведения работ*

На основе выполненных полевых и лабораторных работ было проведено сравнение общей стоимости, затраченной на выполнение всего объема работ каждым методом (рис. 3).

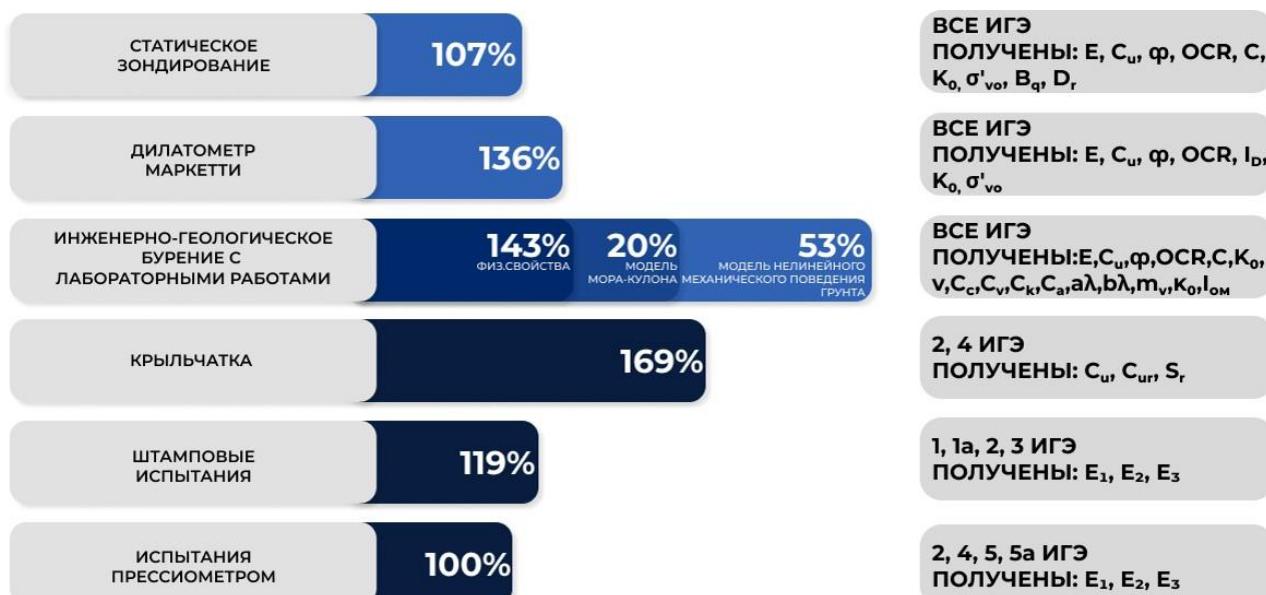


Рис. 3. Относительная стоимость проведения полевых испытаний, %

В качестве эталонной стоимости был выбран полевой метод, на выполнение которого было затрачено наименьшее количество финансовых средств. В данном случае это прессиометрические испытания РМТ.

Из гистограммы относительной стоимости (см. рис. 3) следует, что проведение инженерно-геологического бурения и последующих лабораторных исследований по стоимости более чем в два раза дороже по сравнению с исследованиями с использованием прессиометра или статического зондирования.

На проведение испытаний с использованием статического зондирования потребовалось несколько больше финансовых ресурсов, чем для проведения испытания прессиометром. Однако, с помощью статического зондирования удалось получить большее количество физико-механических параметров и исследовать все ИГЭ, выделенные на участке работ.

Следует отметить, что штамповье и прессиометрические испытания проводились для части исследуемого массива грунта до глубины 13,5 м (штампы) и начиная с глубины 13,5 м (прессиометры). Ни один из этих методов в отдельности не позволил изучить геологическую среду на всей исследуемой глубине, поэтому эти испытания следует рассматривать как одно целое и, следовательно, временные трудозатраты на их проведение и стоимость полевых работ следует рассчитывать вместе.

Из гистограммы относительной стоимости проведения работ за 1 пог. м для статического зондирования, дилатометрического испытания и инженерно-геологического бурения с лабораторными работами следует, что стоимость 1 м бурения с проведением лабораторных работ более чем в 2,5 раза выше стоимости проведения исследований грунтов статическим зондированием и в два раза выше стоимости проведения дилатометрических испытаний (рис. 4).

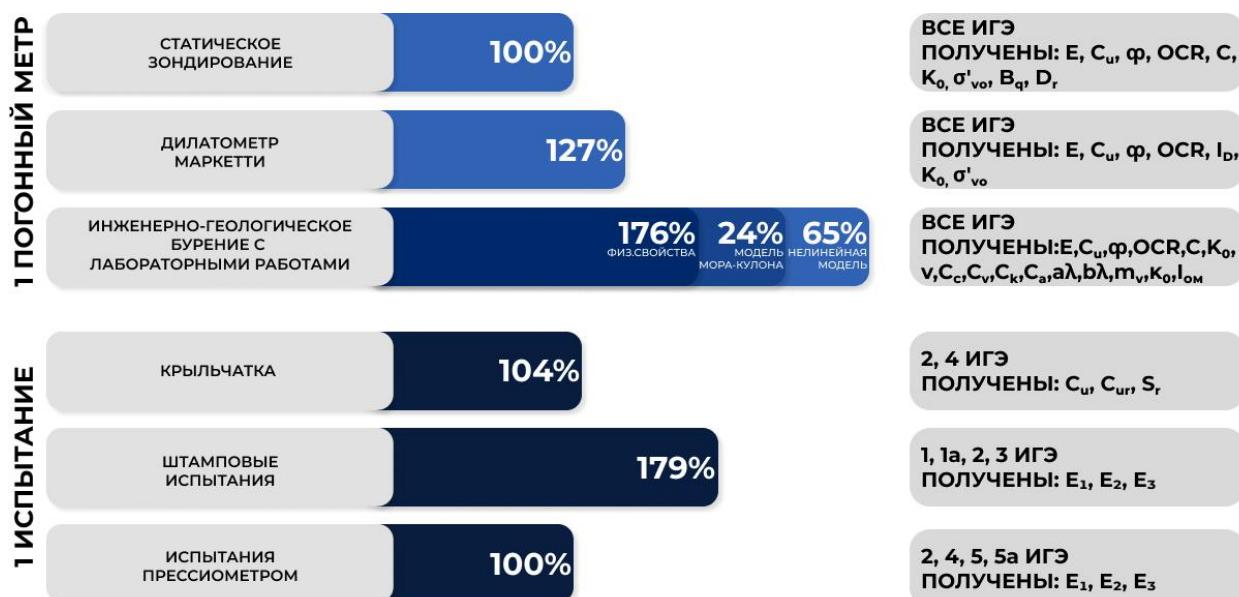


Рис. 4. Относительная стоимость 1 пог. м и одного проведенного испытания, %

Из гистограммы относительной стоимости проведения работ за одно испытание для вращательного среза (крыльчатка), штампом, прессиометром следует, что проведение испытаний штампом дороже почти в 1,8 раза по сравнению с другими видами (см. рис. 4).

Из гистограммы относительной стоимости проведения работ каждым методом на получение физико-механических характеристик, одного из выделенных ИГЭ в полном объеме, следует, что испытания статическим зондированием как минимум в 1,5 раза дешевле остальных методов и дают больше физико-механических характеристик. Проведение испытаний крыльчаткой в 5,5 раз дороже статического зондирования, и выше по относительной стоимости других методов, примерно, в три раза. Прежде всего это связано с дороговизной проведения испытаний крыльчаткой на большой глубине, малым количеством исследуемых ИГЭ, а также большим количеством проведенных испытаний на каждого ИГЭ (рис. 5).

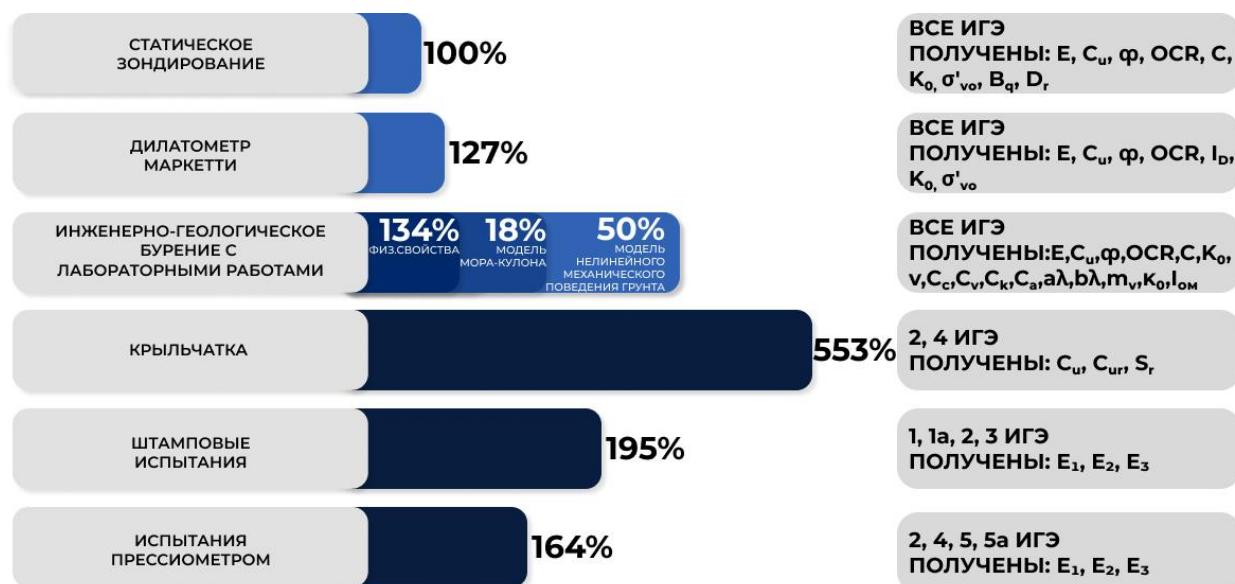


Рис. 5. Относительная стоимость проведения полевых испытаний на один ИГЭ, %

На основе данных об относительной стоимости и длительности проведенных работ была составлена диаграмма эффективности инженерно-геологических методов (рис. 6).

На диаграмме эффективности показаны все выполненные полевые методы исследования грунтов и приведено инженерно-геологическое бурение с различными вариантами проведения лабораторных исследований грунтов:

1) инженерно-геологическое бурение с получением физических свойств грунтов;

2) инженерно-геологическое бурение с получением физических свойств грунтов и модели Мора – Кулона;

3) инженерно-геологическое бурение с получением физических свойств грунтов, моделей Мора – Кулона и нелинейного механического поведения грунта.

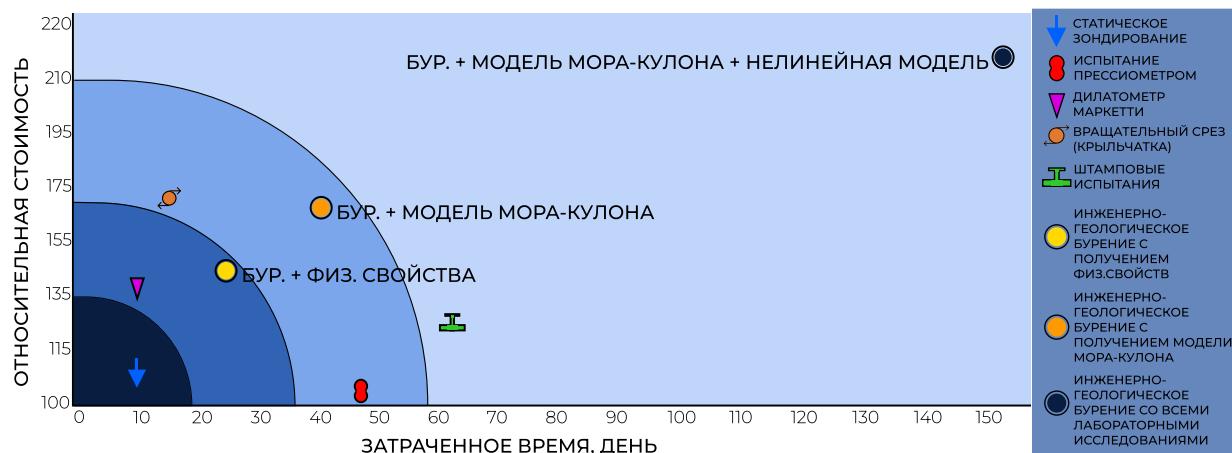


Рис. 6. Диаграмма эффективности инженерно-геологических методов

Из диаграммы следует, что для получения данных геологической среды статическое зондирование СРТ является наиболее эффективным методом. Метод позволяет получить данные в короткий срок, при относительно минимальной стоимости. Испытания крыльчаткой и дилатометром Маркетти также позволяют получить данные в короткий срок, но по более высокой цене.

### Цифровой формат первичных данных

При первоначальном получении данных об изучаемом геологическом массиве всегда присутствует риск их неверной интерпретации.

Цифровизация данных – это процесс превращения аналоговых данных и рабочих процессов в цифровой формат. Она включает в себя использование цифровых технологий для автоматизации рабочих процессов, повышения качества предоставляемых услуг, оптимизации производства и повышения эффективности работы организаций и предприятий в целом.

При обработке данных, полученных при исследовании грунтов статическим зондированием СРТ, дилатометром DMT, испытанием на вращательный сдвиг VST и при лабораторных исследованиях, аналоговые данные преобразуются в цифровой код с помощью электронного устройства. Этот метод упрощает доступ к полученным данным и ускоряет процесс обработки, устранив субъективность интерпретации и возможность ошибок, связанных с работой оператора.

Обработка первичных данных, полученных при бурении инженерно-геологических скважин ВН, штамповых испытаниях PLT и испытаниях с использованием прессиометра РМТ, выполняется оператором. Процесс обработки данных даже опытным оператором, особенно при работе с большими

объемами данных, может привести к ошибкам и требует значительных временных затрат.

### *Объем получаемых данных*

При проведении инженерно-геологического бурения в комплексе с лабораторными работами, включающими расчет разных моделей грунта, были получены физико-механические характеристики для всех выделенных ИГЭ.

В процессе исследования грунта с использованием статического зондирования и дилатометра Маркетти также были получены физико-механические характеристики всех выделенных ИГЭ с меньшим количеством параметров за счет определения модели нелинейного механического поведения грунта при лабораторных работах.

При проведении испытаний на вращательный срез, штамповье и прессиометрические испытания была исследована лишь часть ИГЭ из-за особенностей проведения испытаний этими методами. Кроме того, данные полевые методы позволяют получить физико-механические параметры грунта лишь в небольшом количестве.

На основе всего объема проведенных определений физико-механических характеристик каждым методом для одного из ИГЭ (для примера) была составлена табл. 3.

Таблица 3  
 Количество определений основных физико-механических параметров на примере ИГЭ-2

Параметр	Статическое зондирование	Дилатометр Маркетти	Вращательный срез	Испытания штампом	Прессиометрические испытания	Лабораторные испытания			
						$E_0$ 0,1–0,2	$E_0$ 0,2–0,4	$E_{mod}$ 0,1–0,2	$E_{mod}$ 0,2–0,4
Модуль общей деформации $E$ , МПа	1514	117	–	3	6	14	14	14	14
Угол внутреннего трения $\phi$ , °	1514	–	–	–	–	6			
Сопротивление недренированному сдвигу $C_u$ , кПа	1514	117	13	–	–	8			
Сцепление $c$ , кПа	1514	–	–	–	–	6			

В табл. 3 для примера представлен один из инженерно-геологических элементов площадки – ИГЭ-2, т.к. в нем проводились испытания грунтов всеми методами. Однако результаты из табл. 3 можно применить и к другим ИГЭ, получатся сходные данные и соотношения.

Статическое зондирование позволяет получать наибольшее количество определений физико-механических свойств грунта, поскольку позволяет считывать и обрабатывать данные о грунте непрерывно, через каждые 2 см пройденного зондом расстояния. Благодаря такому количеству непрерывных определений, можно получить детальное представление о структуре грунтового массива и его неоднородности.

Значительный объем данных позволяет выполнить более точную статистическую обработку, снижая риск неверных выводов.

### *Выводы*

По стоимости проведения работ статическое зондирование СРТ является наиболее экономически эффективным полевым методом на примере данного объекта.

По объему данных СРТ позволяет получить наибольшее количество и объем определений физико-механических характеристик грунта, чем другие методы.

Цифровизация данных, полученных статическим зондированием СРТ, дилатометрическими испытаниями DMT, испытаниями крыльчаткой VST и лабораторными исследованиями позволила обобщить характеристики геологической среды непосредственно в момент их проведения, при этом интерпретация аналоговых данных производилась электронным устройством, что повысило скорость обработки и исключило ошибки, связанные с деятельностью оператора.

Анализ расчета затраченного времени в виде трудозатрат выявило наибольшую эффективность полевых методов при проведении статического зондирования СРТ, дилатометрических испытаний DMT, испытаний на вращательный срез VST.

Статическое зондирование по соотношению между достигнутым результатом и использованными ресурсами является наиболее эффективным методом.

### **Список литературы**

1. Мирный А.Ю. Аналитическое сопоставление методов прямого определения параметров деформируемости грунта // Геотехника. 2018. Том X. № 1–2. С. 40–50.
2. СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.

3. Kulhawy F.H., Mayne P.W. Manual on estimating soil properties for foundation design. Ithaca, NY, USA: Cornell University, 1990. 306 p.
4. Rad N.S., Lunne T. Direct correlations between piezocone test results and undrained shear strength of clay // Proceedings of the 1st International Symposium on penetration testing “Penetration Testing 1988”. Rotterdam, The Netherlands: Balkema, 1988. Vol. 2. P. 911–917.

**S.Yu. Galkin, A.I. Sharafetdinov, A.V. Blazhko, N.G. Volkov**

GEOINGSERVICE LLC, Moscow, s.galkin@giscpt.com, Sharafetdinov.anvar@gmail.com,  
a.blazhko@giscpt.com, n.volgov@giscpt.com

## **COMPARISON OF EFFICIENCY OF FIELD AND LABORATORY METHODS OF DETERMINING PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF SOILS**

**Abstract.** Using the example of an object, a comparison was made of the effectiveness of determining the physical and mechanical properties of soils using various field and laboratory methods. The following field methods were considered in the study: cone penetration test, Marchetti dilatometer testing, vane shear testing, geotechnical drilling, pressuremeter testing, plate load testing and a set of laboratory methods sufficient for the Mohr – Coulomb model and the nonlinear mechanical behavior model of soil. The effectiveness of determining the physical and mechanical properties of soils using the mentioned methods was analyzed by comparing the costs of performing each type of work, the volume and amount of data obtained using each method, the presentation of primary data in digital form, and the duration of each individual method.

**Key words:** effective field engineering-geological methods; cone penetration test; Marchetti dilatometer test; vane shear test; geotechnical drilling with laboratory work; plate load test; pressureometric tests.

**Кочев А.Д.**

ООО «Институт “Транспроектинжиниринг”», г. Москва, a.kochev@mail.ru

## **СВЕДЕНИЯ О КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ВОРОНКАХ В г. МОСКВЕ**

**Аннотация.** Представлены новые детальные сведения о карстово-суффозионных воронках (КСВ), образовавшихся в г. Москве. Анализ данных о КСВ, а также инженерно-геологических условий и природы их образования показал следующее: 1) активизация карстово-суффозионных процессов в г. Москве была вызвана мощными откачками из трещинно-карстовых вод; 2) количество КСВ и информация о них недостаточны для формирования представительных выборок для проведения статистической обработки данных; 3) распределение значений параметров воронок не отвечает нормальному или логнормальному закону; значения диаметров варьируют от 1,5 до 53,0 м; 4) КСВ развивались в разных инженерно-геологических условиях, определяющих во многом их размеры; 5) для половины КСВ не определены даты их образования; отсутствовала многолетняя наблюдательная сеть за развитием воронок. Выявленные закономерности позволяют сделать вывод о том, что применение некоторых вероятностных методов (вычисление показателя интенсивности провалообразования, определение параметров расчетного пролета) не представляется корректным и не является обоснованным.

**Ключевые слова:** карстово-суффозионные воронки; интенсивность провалообразования; расчетный пролет; распределение значений параметров воронок; откачки из трещинно-карстовых вод; мощность разделяющих глин.

### *Введение*

Во второй половине прошлого столетия резко активизировались случаи образования карстово-суффозионных воронок (КСВ), что большинством специалистов связывается с проведением мощных откачек из трещинно-карстовых вод [1, 5, 13, 21], вызванных интенсивной работой ряда водозаборов и особенно водозабора, расположенного на территории Курчатовского института. При этом были деформированы и впоследствии разрушены пять жилых зданий; все жильцы этих домов были своевременно эвакуированы, никто из них не пострадал. Деформация зданий протекала не катастрофично, постепенно, что связано с относительно медленным ростом КСВ в отличие от мгновенных провалов [1, 8, 21].

Общеизвестные 42 КСВ образовались на северо-западе г. Москвы на площади порядка 11 км<sup>2</sup>. Все они приурочены к третьей (ходынской) надпойменной террасе р. Москвы, в палеогеоморфологическом отношении тяготеют к доледниковой долине, а некоторые из них – к пересечению юрской и доледниковой долин [1, 5, 8, 21]. По мнению многих специалистов, первые случаи образования КСВ зафиксированы в конце 1950-х – 1960-х гг.

### Анализ данных о КСВ

#### Время образования воронок

Как видно из рис. 1, распределение воронок г. Москвы во времени является полинормальным. Следует добавить, что достаточно четко время образования определено лишь для 20 из 42 КСВ, т.е. только для половины. Для других же даты установлены приблизительно, часто со слов местных жителей, длительное время проживающих в данном районе.

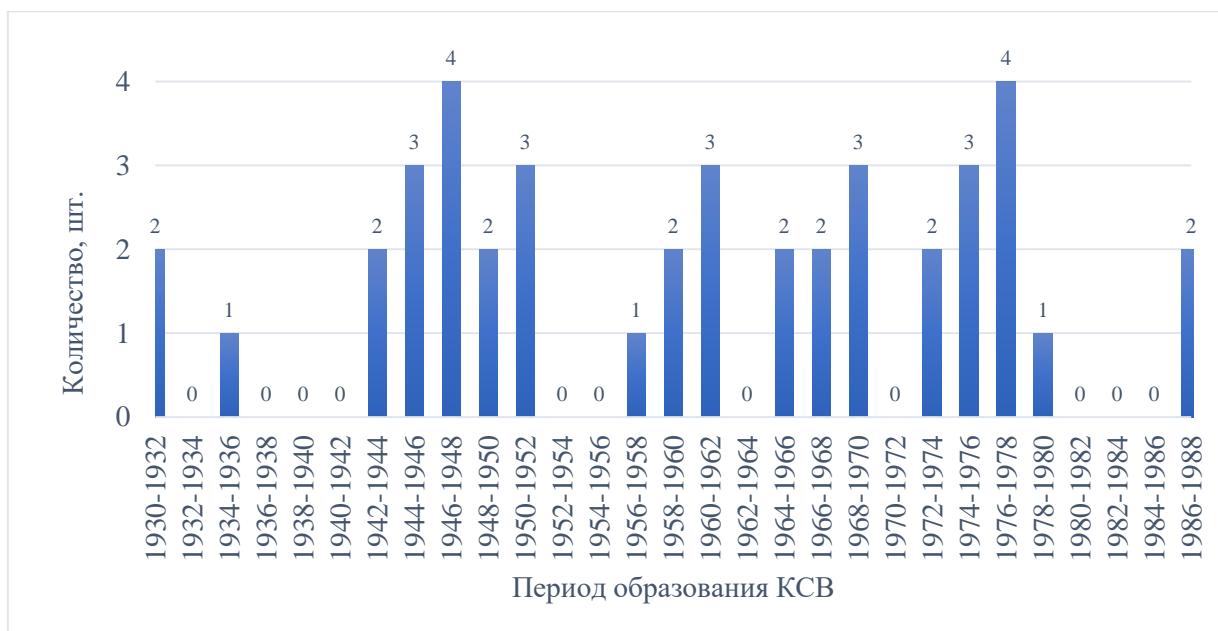


Рис. 1. Гистограмма времени образования КСВ

На рис. 1 наблюдаются две основные совокупности воронок – 1942–1952 гг. и 1956–1980 гг. Начало проведения мощных откачек соответствует следующим годам: Хладокомбинат № 7 – с 1933 г., ТЭЦ-16 – с 1955 г., Курчатовский институт – с 1957 г. Обособленно отстоящая от общей группы воронка 1934–1936 гг. проявилась первой и почти сразу после начала работы водозабора на Хладокомбинате № 7, поскольку расположена в непосредственной близости от него; две воронки на ул. Тухачевского проявили себя после некоторого затишья – в 1987–1988 гг. Несмотря на то, что они расположены ближе к Курчатовскому институту, мощность разделяющих глин на этих участках относительно высока, что потребовало больше времени на их разрушение. Воронки 1930–1932 гг. или, как их чаще называют, «мульды оседания», по мнению автора, не связаны с карстом, а являются заброшенными песчаными карьерами, используемыми для добычи песка для начавшегося в это время строительного освоения данной территории.

Таким образом, карстово-суффозионные процессы (КСП) на северо-западе г. Москвы спровоцированы исключительно техногенными факторами –

откачками из трещинно-карстовых вод с неравномерным («рваным») режимом, что практически не позволяет использовать вероятностно-статистические методы для оценки их опасности, применяя показатель интенсивности провалообразования [16], поскольку производимые откачки не носят закономерного характера и их проведение связано лишь с потребностями технологических процессов. Таким образом, развитие КСП всецело зависит от периодов проведения откачек. Кроме того, общее количество воронок (42 шт.) крайне мало для статистической обработки, а достоверно установленных с точки зрения генезиса образования еще меньше (14 шт.). Для проведения стохастических расчетов важно определить минимальный объем выборки [3], а также число интервалов группирования значений для построения гистограмм, используя соответствующие формулы, например, Стерджеса. Ориентировочно оцененный минимальный объем выборки для значений диаметров КСВ для математико-статистической обработки должен составлять не менее 80, что вызвано большим разбросом значений их диаметров (от 1,5 до 53,0 м). Поэтому можно оперировать лишь понятиями «среднеарифметические значения», а не «среднестатистические». К некорректности применения показателя интенсивности провалообразования можно добавить неопределенность количества КСВ в г. Москве, временного периода их образования и выбора оцениваемой площади распространения КСП [1, 2, 4, 12, 14, 20], т.е. всех основных составляющих, необходимых для расчета. Сюда следует отнести и отсутствие «систематической регистрации случаев образования провалов на определенной площади» [16].

Это в значительной степени затрудняет оценку опасности территории по возможности развития КСП в г. Москве и направляет исследования на более детальное изучение инженерно-геологических условий с привлечением комплекса геофизических методов [7, 11, 13]. Такой же подход был сформулирован несколько позже в работе [16], в п. 5.92 которой указано, что на территориях городов «требуется расширить комплекс применяемых методов и увеличить объемы работ по изучению условий и закономерностей развития карста, выявлению и оценке его подземных проявлений и механизма провалообразования, а оценка устойчивости дается **ориентировочно** по результатам выполненных исследований с использованием выявленных закономерностей и метода аналогии».

## **Диаметры воронок**

Во многих работах указано, что распределение размеров КСВ зачастую отвечает нормальному или логнормальному закону [16, 17]. Однако иногда распределение имеет полимодальный характер. В таких случаях «выясняются **причины** их появления, которые могут быть связаны с различиями в **условиях и механизме формирования провалов и воронок**, и, соответственно, с наличием нескольких морфогенетических типов...» [16, п. 5.93].

На рис. 2 показано распределение диаметров КСВ, в котором отмечается два максимума со значениями 5–10 и 20–25 м, что предполагает необходимость поиска причин такого полимодального распределения.

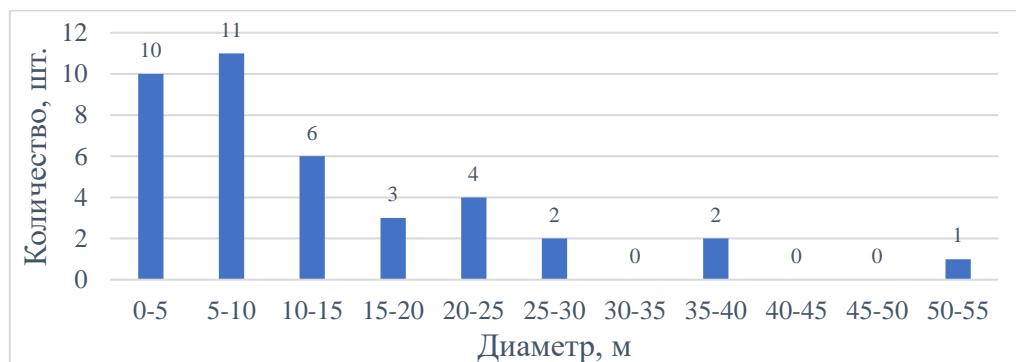


Рис. 2. Гистограмма распределения диаметров КСВ

Значения диаметров КСВ изменяются от 1,5 до 53,0 м при среднем значении 13,8 м. Следует добавить, что некоторые воронки активизировались впоследствии до двух раз, причем их диаметр и глубина при этом могли как увеличиваться относительно первоначального проявления, так и оказаться меньше.

### ***Мощность покровной мезо-кайнозойской толщи***

Глубина залегания первой карстующейся толщи карбонатных пород варьирует в пределах значений 25,0–65,0 м, при среднем 41,4 м. Зависимость диаметра КСВ от мощности покровной толщи, включающей разделяющие относительно водоупорные глины, показана на рис. 3.

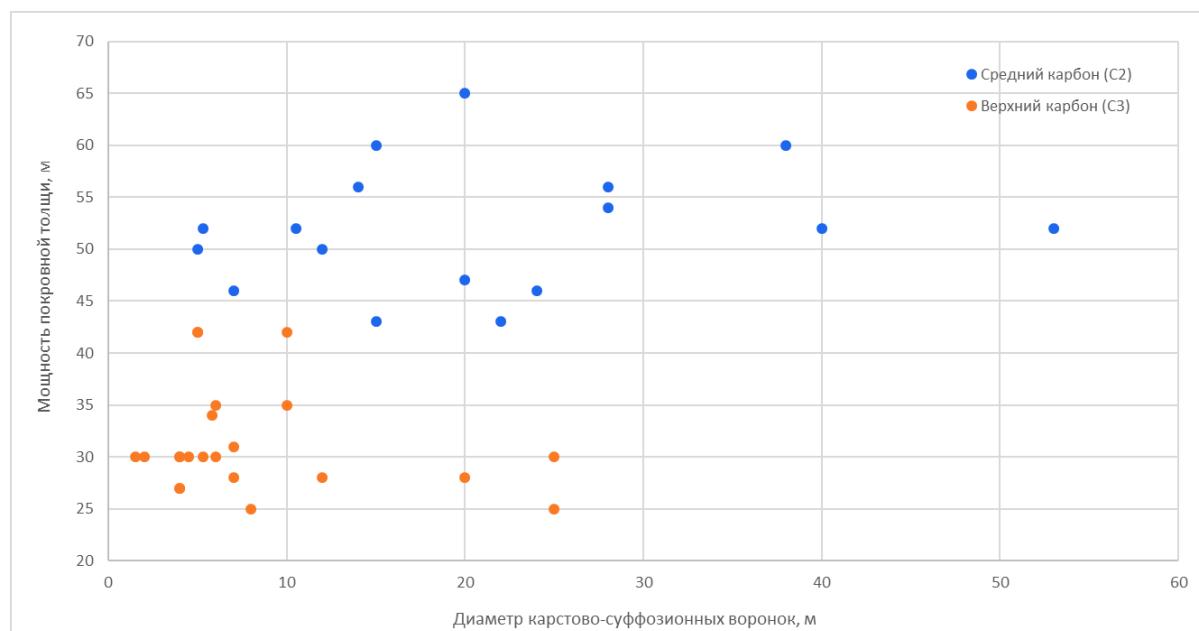


Рис. 3. Зависимость диаметра КСВ от мощности покровной толщи

Из рис. 3 видно, что такая зависимость отсутствует: коэффициент корреляции заметно менее 0,5. Более того, все значения были разбиты на две выборки:

- 1) покровная толща покоится на породах среднекаменноугольного возраста (подольско-мячковские известняки) (синие точки на графике);
- 2) покровная толща покоится на породах верхнекаменноугольного возраста, на так называемом «слоеном пироге», т.е. на переслаивающихся глинистых и закарстованных карбонатных породах (оранжевые точки на графике).

Если рассматривать отдельно эти две выборки, также не обнаружено сколько-нибудь значимой зависимости значений диаметров от мощности залегающей на карбонатном массиве мезо-кайнозойской толщи. Следует отметить, что на рис. 3 легко обнаруживается четкая граница между этими массивами значений. Их раздельный анализ позволяет установить, что среднеарифметическое значение диаметра первой выборки составляет 21,0 м, второй – 8,2 м, а среднее значение всех диаметров воронок в г. Москве – 13,8 м. Необходимо добавить, что отмеченная закономерность проявила себя и на гистограмме распределения диаметров воронок (см. рис. 2), где наблюдается два максимума со значениями диаметров первого в интервале 5,0–10,0 м и, соответственно, второго – 20,0–25,0 м, что в целом отвечает вычисленным средним значениям для разных условий образования КСВ относительно залегания каменноугольных отложений (8,2 и 21,0 м). Объяснить такую закономерность несложно. В случае образования КСВ в условиях присутствия в разрезе переслаивания верхнекаменноугольных глинистых и карбонатных пород значительное сопротивление для выноса песчаного материала создают глинистые слои, кроме того, степень закарстованности карбонатных пород для таких условий заметно ниже, соответственно, ниже и эффективная пустотность. Как следствие, средние диаметры воронок почти в три раза меньше. Таким образом, полимодальное распределение значений диаметров КСВ объясняется различными инженерно-геологическими (геолого-литологическими) условиями образования КСВ.

В связи с этим объединять все значения диаметров КСВ в одну выборку для статистических прогнозных расчетов некорректно. Аналогичное мнение сформулировано в работах [16, 17, 20, 22]. Из сказанного следует и то, что возможность образования КСВ в г. Москве и степень их опасности (включая диаметры КСВ) не зависят от мощности покровной толщи, как, например, в Республике Башкортостан (ТСН 302-50-95 РБ «Инструкция по изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях» [18]).

Это легко объясняется тем, что главным образом возможность развития КСП зависит от частоты и силы гидродинамического и аэродинамического давления, связанного с проведением мощных откачек из трещинно-карстовых вод и способствующего постепенному разрушению защитных глинистых

отложений, а размеры воронок (помимо прочих условий) – от объема песчаного материала, который способен принять закарстованный массив, точнее от эффективной пустотности карбонатной толщи [9].

### ***Мощность разделяющих глинистых отложений***

На рис. 4 показано распределение мощности перекрывающих закарстованный массив глинистых отложений, причем рассмотрено два варианта: мощность юрских глин и суммарная мощность юрских и каменноугольных глин. В целом мощность глинистых отложений варьирует от 0,1 до 5,0 м, т.е. для образования КСВ необходимо наличие перекрывающих глинистых отложений. Предполагается, что на участках их отсутствия, где песчаные отложения залегают непосредственно на карбонатном массиве, песчаный материал за прошедший значительный период времени в геологическом отношении закальматировал практически все открытые карстовые полости. Такое мнение основано на том, что на участках отсутствия перекрывающих глинистых отложений до настоящего времени не обнаружены КСВ [8, 13, 21].

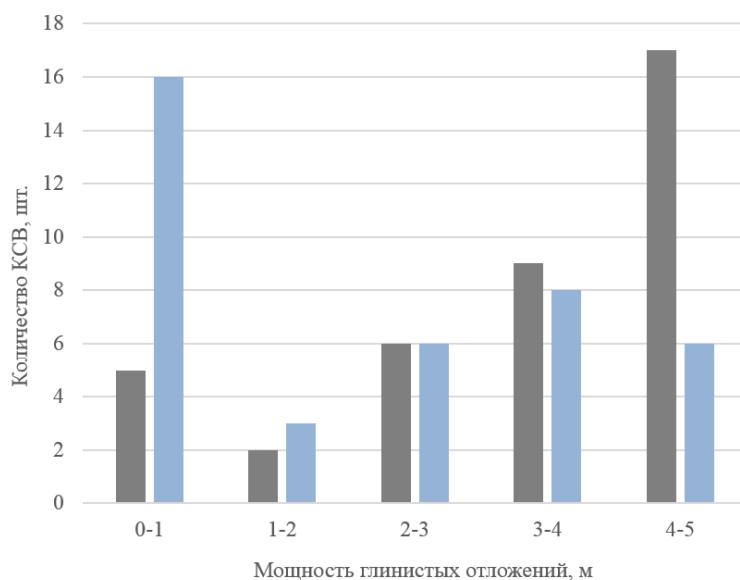


Рис. 4. Гистограмма распределения значений мощности глинистых отложений. *Обозначения:* серый цвет – суммарная мощность юрских и каменноугольных глин; голубой – мощность юрских глин

Следует отметить, что около четверти от всех современных КСВ расположены вблизи древних карстовых провалов. Непосредственно над карстовыми провалами мощность глинистых пород резко увеличена, что можно объяснить заполнением древних провалов глинистым материалом в условиях средне-верхнекаменноугольного моря. Еще Л.Г. Чертковым отмечалось, что на ряде участков образования КСВ в некоторых скважинах

фиксирувались повышенные значения мощности глинистой толщи по сравнению с окружающим массивом, достигающие 10 и более м [21]. Такие локально увеличенные мощности глин отмечаются в местах обнаружения древних карстовых провалов, к которым в 20–25% случаев приурочены современные КСВ. Если не учитывать это обстоятельство, то при оценке опасности возможности развития КСП можно ошибочно опасный участок изысканий отнести к неопасному.

### ***Глубина воронок***

На рис. 5 показано распределение глубин КСВ. Глубины воронок изменяются от 0,5 до 5,0 м при средней глубине 1,95 м (~ 2 м). При этом в литературе иногда встречается информация о воронках диаметром 2 м и глубиной 22 м, чаще упоминается о глубинах до 6–8 м [5, 6, 15], подтверждения размеров которых в архивных материалах по результатам инженерно-геологических изысканий не найдено. Скорее всего, речь шла о древних карстовых провалах. В целом глубины воронок небольшие, что определяется не быстрым (мгновенным) провалом, а относительно медленным оседанием поверхности в пределах ослабленной зоны [9, 21]. Процесс напоминает песочные часы; диаметр и глубина воронок частично контролируются углом естественного откоса.

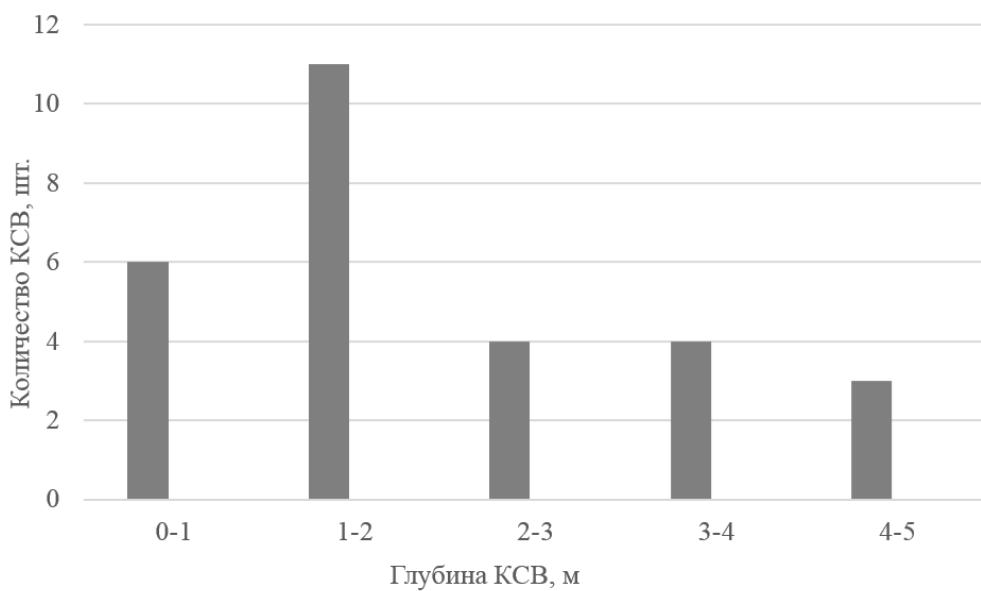


Рис. 5. Гистограмма распределения глубин КСВ

В связи с этим и деформации зданий происходили постепенно [13, 21], без мгновенных обрушений (рис. 6). Это позволило штатно провести эвакуацию всех жителей без катастрофических последствий. Необходимо отметить, что разрушенные здания покоялись на ленточных фундаментах.



Рис. 6. Развитие деформаций и разрушений жилого пятиэтажного здания.  
Фото Л.Г. Черткова

Разрушение современных зданий и сооружений на плитном фундаменте, скорее всего, будет иметь несколько иной характер с возможным более быстрым разрушением конструкций благодаря накоплению напряжений и мгновенной их разгрузки по достижении ослабленной зоной критических размеров (триггерный эффект).

Из сказанного следует, что специалисты, которые используют показатель интенсивности провалообразования и расчетный пролет карстового провала для оценки опасности КСП в г. Москве, игнорируют региональные особенности развития карста и КСП [10, 19]. По мнению автора, не следует автоматически переносить методы, апробированные в некоторых районах России, на всю ее территорию.

### *Выводы*

1. Приведены уточненные сведения о параметрах КСВ в г. Москве: количество воронок, время образования, значения диаметров, глубин, мощность глин на участках образования воронок, распределение их значений и др. Диаметры воронок меньше почти в три раза (средние диаметры 8,2 и 21,0 м для двух выделенных выборок) на участках, где развиты верхнекаменноугольные породы (так называемый «слоеный пирог»); средний диаметр всех воронок – 13,8 м.

2. Анализ времени введения в эксплуатацию крупных водозаборов подтвердил природу КСП, связанную с мощными откачками циклического характера. Образование КСВ определяется главным образом временем проведения таких откачек.

3. Небольшое количество КСВ в г. Москве (отсутствие репрезентативных объемов выборок), полимодальный характер распределения их параметров, отсутствие многолетней наблюдательной сети, а для половины КСВ – точных дат

образования, неоднозначность определения площади развития КСП, а также сугубо техногенная природа образования воронок, не позволяют использовать предлагаемые в настоящее время вероятностные методы для оценки опасности развития КСВ (расчет показателя интенсивности провалообразования и вычисления расчетного пролета карстового провала).

4. Оценка опасности развития КСП в г. Москве должна базироваться на детальном изучении инженерно-геологических условий, выявлении закономерностей развития и протекания КСП, выбора ведущих признаков, вклад которых наибольший (значимый) для проведения районирования территории и прогноза степени опасности рассматриваемых процессов.

### Список литературы

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: Изд-во РУДН, 2017. 325 с.
2. Елкин В.А. Оценка карстовой опасности при инженерных изысканиях: обзор российских нормативных технических документов // Инженерные изыскания. 2018. Т. XII. № 11–12. С. 12–24. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-12-24>.
3. Калинин Э.В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование. М.: Изд-во МГУ, 2006. 256 с.
4. Катаев В.Н., Ерофеев Е.А. Краткий исторический обзор теоретического и практического опыта применения вероятностно-статистических методов в карстоведении // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. С. 477–490.
5. Кожевникова В.Н. Особенности механизма образования просадок и провалов в результате изменений гидрогеологических условий закарстованных территорий // Прогноз изменения гидрогеологических условий застраиваемых территорий: сборник научных трудов ПНИИИС / Под ред. И.Я. Пантелейева. М.: Стройиздат, 1980. С. 116–132.
6. Котлов Ф.В., Медведев О.П., Кожевникова В.Н., Киселева З.Т. Антропогенная активизация карстово-супфазионных процессов // Труды ПНИИИС. 1976. Вып. 43. С. 4–11.
7. Кочев А.Д. Опыт изучения механизма образования карстово-супфазионной воронки в условиях крупного города // Тезисы докладов регионального совещания «Проблемы изучения техногенного карста». Кунгур, 1988. С. 78–79.
8. Кочев А.Д. Природа и механизм карстово-супфазионных процессов на территории г. Москвы и совершенствование методики их инженерно-геологического изучения: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Изд-во МГРИ им. С. Орджоникидзе, 1990. 169 с.

9. Кочев А.Д. Изучение механизма образования карстово-суффозионных воронок в г. Москве // Инженерная геология. 2021. Т. XVI. № 4. С. 34–45. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-4-34-45>.
10. Кочев А.Д. Региональный подход при проведении инженерно-геологических изысканий на закарстованных территориях // Материалы Международной научно-практической конференции III Крымские карстологические чтения «Теория и практика современной карстологии и спелеологии». Симферополь: Изд-во Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, 2021. С. 62–67.
11. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л. К вопросу инженерно-геологического районирования территории северо-запада г. Москвы по степени опасности развития карстово-суффозионных процессов // Материалы научно-практической конференции «Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения». М.: ООО «Геомаркетинг», 2017. С. 24–40.
12. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л. Карстово-суффозионные процессы на территории г. Москвы и проблема оценки их опасности // Инженерная геология. 2018. Т. XIII. № 6. С. 24–32. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-24-32>.
13. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л., Афанасьев В.Ю. Методика и результаты комплексного изучения карстово-суффозионных процессов в г. Москве // Инженерная геология. 1989. № 6. С. 77–94.
14. Кропоткин М.П. Оценка опасности карстового провалообразования – детерминированная или стохастическая? // Инженерные изыскания. 2018. Т. XII. № 9–10. С. 12–26. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-9-10-12-26>.
15. Медведев О.П., Ильинская И.М. Один из принципов инженерно-геологического районирования карстоопасных территорий // Инженерные изыскания в строительстве. 1979. Вып. 5. С. 8–10.
16. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: Изд-во ПНИИС, 1995. 167 с.
17. Толмачев В.В., Ройтер Ф. Инженерное карстоведение. М.: Недра, 1990. 152 с.
18. ТСН 302-50-95 РБ Инструкция по изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях.
19. Учет региональных особенностей при разработке СП «Инженерные изыскания для строительства на закарстованных территориях. Общие требования» / А.Д. Кочев, А.В. Аникеев, М.И. Богданов, В.А. Елкин, В.Г. Камалов // Материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в

строительстве в Российской Федерации». М.: ООО «Геомаркетинг», 2018. С. 720–721.

20. Хоменко В.П. Нормативная оценка карстовой опасности: кризисная ситуация // Материалы российской конференции с международным участием «Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях». Уфа: Изд-во ГУП Институт «БашНИИстрой», 2012. С. 240–245.
21. Чертков Л.Г. Карстовые и супфазионно-провальные явления на территории г. Москвы и методика их инженерно-геологического изучения: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1984.
22. Щербаков С.В., Катаев В.Н., Золотарев Д.Р., Ковалева Т.Г. Поверхностные деформации в условиях покрытого карста: комплексирование методов оценки морфометрических параметров в инженерных целях // Инженерная геология. 2018. Т. XIII. № 6. С. 10–23. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-10-23>.

**A.D. Kochev**

Institute “Transprojectengineering” LLC, Moscow, a.kochev@mail.ru

## **INFORMATION ABOUT KARST-SUFFOSION FUNNELS IN MOSCOW**

**Abstract.** New detailed information about karst-suffusion funnels (KSF) formed in Moscow is presented. Analysis of data on KSF, as well as engineering-geological conditions and the nature of their formation showed the following: 1) the activation of karst-suffusion processes in Moscow was caused by significant pumping from fissure-karst waters; 2) the number of KSF and information about them are insufficient to form representative samples for statistical data processing; 3) the distribution of funnel parameter values does not correspond to the normal or lognormal law; diameter values vary from 1.5 to 53.0 m; 4) KSF developed under different engineering-geological conditions, which largely determined their sizes; 5) for half of the KSF, the dates of their formation have not been determined; there was no long-term observation network for the development of funnels. The revealed patterns allow us to conclude that the use of some probabilistic methods (calculating the indicator of the intensity of failure formation, determining the parameters of the design span) does not seem correct and is not justified.

**Key words:** karst-suffusion funnels; sinkhole intensity; design span; distribution of funnel parameter values; pumping from fissure-karst waters; thickness of separating clays.

**Никитин М.С.<sup>1</sup>, Сенцова Е.А.<sup>1</sup>, Вознесенский Е.А.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии,  
г. Москва, mikes.nikitin@gmail.com, sentsovaea@gmail.com

<sup>2</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, eugene@geol.msu.ru

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБРАБОТКИ ТРЕХОСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ ВВЕДЕНИЯ ПОПРАВКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДИ ОБРАЗЦА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТА**

**Аннотация.** Неотъемлемой частью обработки трехосных испытаний дисперсных грунтов с пластичным вариантом разрушения является учет изменения площади образца во время девиаторного нагружения. В работе представлены результаты обработки серии консолидировано-недренированных стабилометрических испытаний глинистого грунта без учета поправки и с ее введением. Проведена оценка накопленной ошибки, сформированной за счет отсутствия поправки на изменение площади образца во время девиаторного нагружения, в определении угла внутреннего трения и величины сцепления.

**Ключевые слова:** дисперсные грунты; лабораторные испытания; трехосные испытания; прочностные показатели; условие прочности Кулона – Мора.

В настоящее время сложно представить современную грунтовую лабораторию, не оснащенную камерами трехосного сжатия. В руках грамотного специалиста стабилометр – это отличный инструмент, который позволяет достаточно хорошо смоделировать напряженное состояние грунта в массиве и получить широких спектр характеристик для описания его свойств. В современной практике геотехнических расчетов параметры, полученные с помощью трехосных испытаний, используются во многих математических моделях работы грунтового основания. К сожалению, при их определении зачастую допускаются ошибки, которые в основном связаны с качеством используемых образцов, несоблюдением условий проведения эксперимента и некорректной обработкой полученных результатов.

Цель данной работы обратить внимание научного и профессионального сообщества на важные аспекты обработки результатов трехосных испытаний, а именно на учет введения поправки на изменение площади образца во время проведения экспериментальных исследований дисперсных грунтов.

В ходе трехосных испытаний непосредственно измеряются и регистрируются следующие основные параметры: давление в рабочей камере, поровое давление, объемная и осевая деформации в образце грунта, а также вертикальная сила. Осевое напряжение является расчетным параметром, который вычисляется исходя из величины вертикальной силы и площади, на которую она приходится. Как следствие, для расчета осевого напряжения необходимо учесть некоторый набор поправок, важнейшей из которых является учет изменения площади образца во время проведения эксперимента. Изменение

площади поперечного сечения образца грунта происходит на этапе консолидации и девиаторного нагружения.

При хрупком разрушении образца грунта необходимость введения поправки на изменение площади появляется только при расчете остаточной прочности, т.к. площадь поперечного сечения образца до формирования поверхности скольжения можно считать неизменной. При пластическом варианте разрушения за счет бочкообразного деформирования происходит увеличение поперечного сечения образца, что требует корректного расчета осевого напряжения, в течение всего этапа девиаторного нагружения.

С целью учета формоизменения грунтового образца при проведении трехосных испытаний были разработаны различные математические формулы, обобщенные и опубликованные в работах P. La Rochelle [9] и M. Mulabdic [8].

При пластическом разрушении образцов грунта существуют приведенные ниже варианты расчета.

*«Цилиндрическое» формоизменение*

$$A_i = A_c \left( \frac{1 - \varepsilon_v}{1 - \varepsilon_1} \right). \quad (1)$$

*«Парabolическое» формоизменение*

$$A_i = A_c \left( -\frac{1}{4} + \frac{\sqrt{25 - 20\varepsilon_1 - 5\varepsilon_1^2}}{4(1 - \varepsilon_1)} \right). \quad (2)$$

*«Вытиранье»*

$$A_i = A_c \left( \frac{1 - \varepsilon_v}{1 - b\varepsilon_v} \right), \quad (3)$$

$$b = \frac{1 - \frac{A_c}{A_k}}{1 - \frac{\Delta h_c}{h_c}}, \quad (4)$$

где  $A_i$  – текущая площадь образца грунта при девиаторном нагружении,  $A_c$  – площадь образца грунта после консолидации при консолидированно-недренированных (КН) и консолидированно-дренированных (КД) испытаниях (или реконсолидации при неконсолидированно-недренированных (НН) испытаниях),  $A_k$  – площадь образца после разрушения,  $\varepsilon_1$  – относительная вертикальная деформация образца грунта,  $\varepsilon_v$  – относительная объемная деформация образца грунта,  $h_c$  – высота образца в конце этапа консолидации,

(или реконсолидации при НН-испытаниях),  $\Delta h_k$  – полная деформация образца после испытания.

Применение приведенных формул имеет свои нюансы и допущения, а их выбор определяется экспериментатором исходя из наблюдений за фактическим формоизменением образов во время девиаторного нагружения. Введение поправки на изменение площади образца при обработке результатов трехосных испытаний дисперсных грунтов также регламентируется российскими [1] и зарубежными нормативными техническими документами [3–7].

В ходе поставленной работы на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова была проведена и обработана серия КН трехосных испытаний связных дисперсных грунтов при обжимающих напряжениях в 200/300/400/500/600 кПа. Эксперименты проводились на модельных образцах глинистых грунтов, изготовленных из пасты с заданной влажностью, предварительно уплотненных в консолидометре в течение 24 ч при осевой нагрузке в 80 кПа. По классификации ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация» [2] грунт отнесен к суглинку тяжелому песчанистому полутвердому. Влажность грунта  $W$  варьируется в диапазоне 0,245–0,299 ед., плотность  $\rho = 1,97\text{--}2,01 \text{ г/см}^3$ , коэффициент пористости  $e = 0,74\text{--}0,82$  ед., верхний предел пластичности  $W_L = 0,357$  ед., нижний предел пластичности  $W_P = 0,237$  ед., число пластичности  $I_P = 0,071$  ед., показатель текучести  $I_L = 0\text{--}0,09$  ед.

Обработка результатов экспериментов при расчете осевого напряжения включала введение поправки на изменение площади во время девиаторного нагружения, т.к. все образцы серии имели пластический характер разрушения (бочкообразное формообразование). На рис. приведен результат единичного трехосного испытания – характерная зависимость девиатора от вертикальной деформации во время стадии разрушения, построенная с учетом различных вариантов расчета по формулам (1)–(3). Аналогичным образом были обработаны результаты остальных экспериментов серии. Анализируя полученные данные, было выявлено, что введение поправки на расчет площади значительно влияет на фактическую величину осевого напряжения при девиаторном нагружении. Это влияние раскрывается все сильнее при увеличении уровня деформирования образца. Разница величин максимального девиатора при разрушении грунта без учета поправки и с ее введением варьирует от 20 до 35% во всей серии проведенных испытаний.

Для того чтобы оценить влияние установленной закономерности на величину прочностных свойств исследованных грунтов в рамках условия прочности Кулона – Мора были также рассчитаны угол внутреннего трения и сцепление, полученные по результатам обработки каждого эксперимента серии без учета поправки на площадь, с введением поправки на параболическое, цилиндрическое формоизменение или выпирание (табл.). Накопленная ошибка, сформированная за счет недоучета или отсутствия поправки на изменение

площади образца во время девиаторного нагружения, в определении угла внутреннего трения достигает 7–9 град., а величины сцепления до 3–7 кПа.

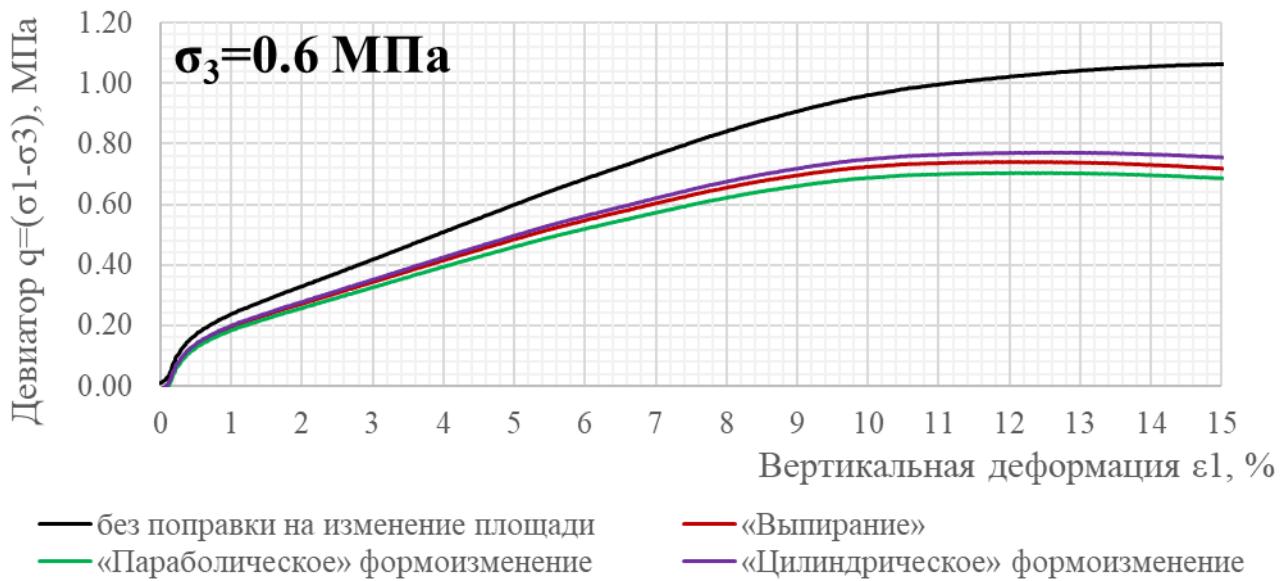


Рис. Характерная зависимость девиатора от вертикальной деформации во время стадии разрушения, построенная с учетом различных вариантов расчета по формулам (1-3)

Таблица  
 Прочностные параметры исследованного грунта

Варианты расчета	Угол внутреннего трения $\phi$ , град.	Удельное сцепление $c$ , кПа
Без поправки на изменение площади образца	27	96
«Выпирание»	20	89
«Цилиндрическое» формоизменение	21	93
«Параболическое» формоизменение	19	91

### Заключение

Введение поправки на изменения площади образца при пластическом деформировании крайне важно при обработке результатов трехосных испытаний дисперсных грунтов, т.к. ее отсутствие ведет к существенному завышению максимального девиатора, определенного в момент разрушения грунта, что неминуемо работает против запаса – завышенные прочностные показатели.

*Работа выполнена на оборудовании, приобретенном в рамках реализации Программы развития Московского университета: установке трехосного сжатия, термостатической анизотропной установке трехосного сжатия для испытания грунтов.*

## Список литературы

1. ГОСТ 12248.3-2020 Грунты. Определения характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия.
2. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация.
3. ASTM D2850-15 Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.
4. ASTM D4767-11(2020) Standard Test Method for Consolidated-Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.
5. ASTM D7181-20 Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils.
6. BS 1377-7:1990 Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests (total stress).
7. BS 1377-8:1990 Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests (effective stress).
8. Mulabdic M. Area correction in triaxial testing. Linkoping, Sweden: SGI, 1993. 21 p.
9. Observational approach to membrane and area corrections in triaxial tests / P. La Rochelle, U.S. Leroue, B. Trak, L. Blais-Leroux, R. Tavenas // Proceedings of the Symposium “Advanced triaxial testing of soil and rock”. Philadelphia, PA, USA: Publishing house of the ASTM, 1988. P. 715–731.

**M.S. Nikitin<sup>1</sup>, E.A. Sentsova<sup>1</sup>, E.A. Voznesensky<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, mikes.nikitin@gmail.com, sentsovaea@gmail.com

<sup>2</sup>Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Moscow, eugene@geol.msu.ru

## METHODOLOGICAL ASPECTS OF AREA CORRECTION OF SPECIMEN IN TRIAXIAL TESTS OF CLAYEY SOILS

**Abstract.** The paper considers the results of consolidated-undrained triaxial compression tests of cohesive soils with and without area correction of sample. The estimation of the accumulated error formed due to the absence of an adjustment for the change of the sample area during the deviatoric loading, in the determination of the internal friction angle and the value of the adhesion is given.

**Key words:** clayey soils; laboratory tests; triaxial test; soil strength; Mohr – Coulomb model.

## СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

**Авдеев В.А., Яблонский Л.И.**

Научный геоинформационный центр РАН, г. Москва, mail@ngic.ru

### **ВОЗМОЖНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

**Аннотация.** Рассмотрены основной состав видов работ и документов технического регулирования инженерно-геодезических изысканий в строительстве. Представлен выборочный перечень нормативных технических документов, регламентирующих инженерно-геодезические изыскания. Установлены существующие в настоящее время проблемные вопросы, влияющие на своевременность и качество разработки нормативных документов. Предложены перспективные направления развития технического регулирования инженерно-геодезических изысканий. Выделено и рассмотрено одно из актуальных перспективных направлений использования в процессе инженерно-геодезических изысканий современных технологий BIM и цифровых двойников. Отмечено, что в России впервые в мировой практике технического регулирования утвержден и введен в действие с 2022 г. стандарт в области цифровых двойников. Показана необходимость проведения исследований по разработке документов технического регулирования практического использования цифровых двойников в сфере инженерных изысканий.

**Ключевые слова:** инженерно-геодезические изыскания; нормативные технические документы; техническое регулирование; перспективы развития; цифровой двойник.

В соответствие с нормативными положениями СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96», инженерные изыскания включают основные и специальные виды инженерных изысканий, в состав которых входят инженерно-геодезические изыскания [6]. Требования к инженерно-геодезическим изысканиям установлены в разделе 5 данного свода правил, а также в СП 317.1325800.2017 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [7]. В целях получения требуемых актуальных топографических и геодезических данных на территорию строительства согласно п. 5.1.3, 5.1.4 СП 47.13330.2016 выполняется следующий состав видов работ инженерно-геодезических изысканий (рис. 1).

Выполнение представленных видов работ технически регулируется нормативными документами, которые объединены в следующие основные виды (рис. 2).

Существенную роль в техническом регулировании инженерно-геодезических изысканий занимают своды правил, строительные нормы и правила, а также государственные стандарты, и, в частности, нормативные документы, представленные на рис. 3.

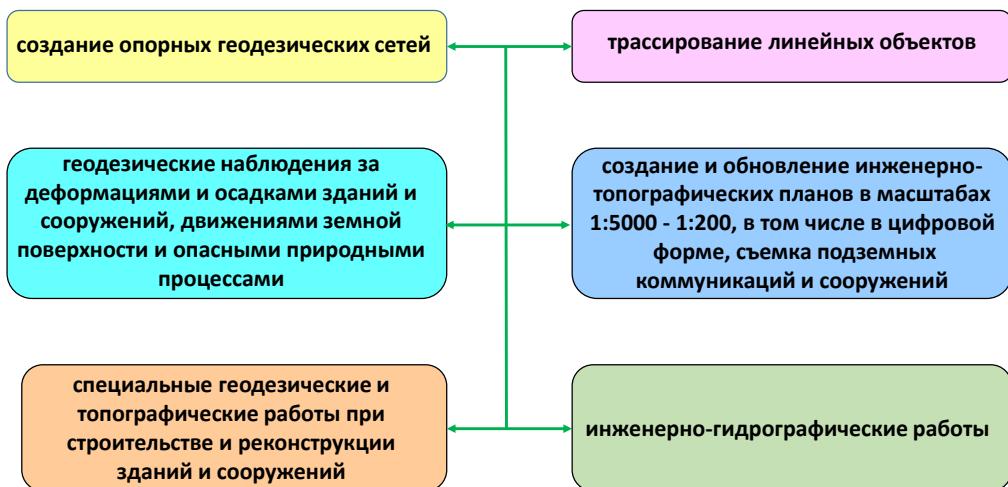


Рис. 1. Состав видов работ инженерно-геодезических изысканий

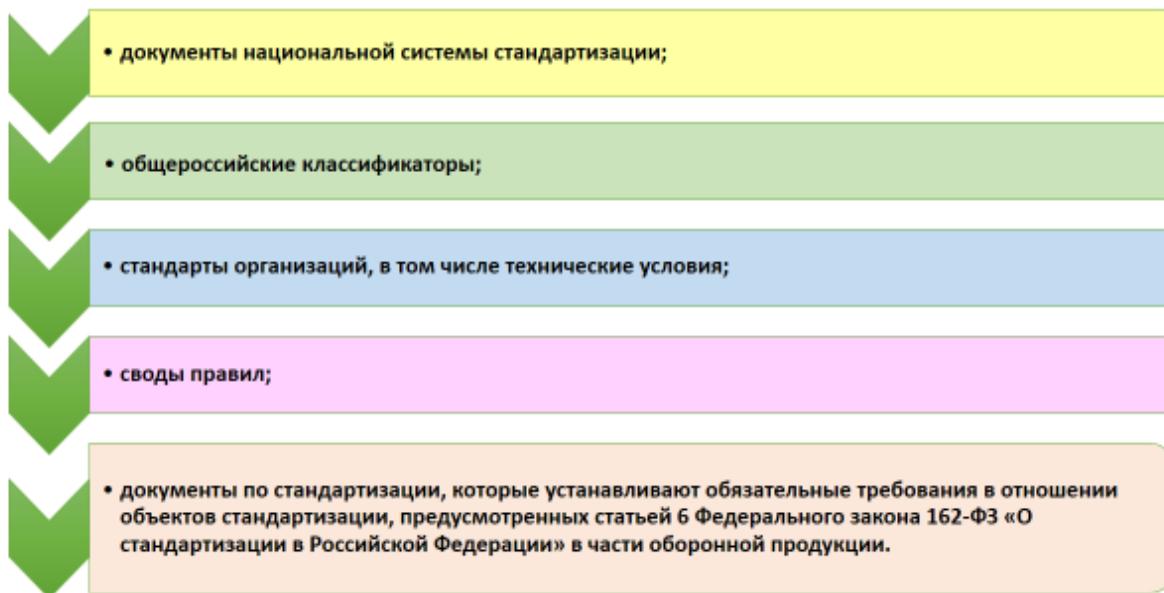


Рис. 2. Основные виды нормативных документов технического регулирования инженерно-геодезических изысканий

От качественной и своевременной разработки и введения в практику инженерных изысканий актуальных нормативных документов во многом зависит результативность и надежность выполнения строительных работ. К сожалению, в настоящее время действующее техническое регулирование инженерно-геодезических изысканий не в полной мере удовлетворяет современным и перспективным требованиям активно развивающейся строительной отрасли. По мнению авторов, это прежде всего связано с существующими проблемными вопросами разработки нормативных технических документов (рис. 4).

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
 «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
 г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

№№ п/п	Нормативный акт	Название
1	СП 317.1325800.2017	Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства (ред. от 30.05.2022)
2	СП 47.13330.2016	СНиП 11-02-96 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения
3	СП 47.13330.2012	Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96
4	СНиП 11-02-96	Инженерные изыскания для строительства. Основные положения
5	СНиП 3.01.03-34	Геодезические работы в строительстве
6	СНиП 12-03-2001	Безопасность труда в строительстве. Часть I. Общие требования
7	СНиП 3.01.03-84	Геодезические работы в строительстве
8	СП 11-104-97	Инженерно-геодезические изыскания для строительства
9	ГОСТ 21.610-85	Газоснабжение. Наружные газопроводы
10	ГОСТ 22263-76	Геодезия. Термины и определения.
11	ГОСТ 22263-76	Картография. Термины и определения.
12	ГОСТ 28441-99	Картография цифровая. Термины и определения
13	ГОСТ Р 21.1101-2009 - СПДС	Основные требования к проектной и рабочей документации.
14	ГКИИП-02-033-82	Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:3000, 1:2000, 1:1000, 1:500, 1:500, 1983 г.
15	ГКИИП (ГНТА)-03-010-02	Инструкция по нивелированию 1,2,3 и 4 классов
16	ГКИИП (ГНТА)-17-004-99	Инструкция о порядке контроля и приемки геодезических, топографических и картографических работ
17	ГКИИП-07-016-91	Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей.
18	РСЧ 72-88	Инженерные изыскания для строительства - Технические требования к производству съемок подземных (надземных) коммуникаций
19	РТМ 68-13-99	Условные графические изображения в документации геодезического и топографического производства
20	РТМ 68-14-01	Спутниковая технология геодезических работ. Термины и определения.
21	ВСН 51-03-01-76	Инструкция о составе и оформлении технологических рабочих чертежей зданий и сооружений газовой промышленности
22	РСЧ 72-88	Правила по технике безопасности на топографо-геодезических работах

Рис. 3. Нормативные документы технического регулирования инженерно-геодезических изысканий



Рис. 4. Основные проблемные вопросы разработки нормативных технических документов

Важнейшим проблемным вопросом продолжает оставаться недооценка роли инженерных изысканий, включая инженерно-геодезические изыскания, в процессе градостроительного освоения территорий со стороны заказчиков, что проявляется и на государственном уровне. Нужно признать, что за последние годы технологии производства геодезических работ получили наибольшее

развитие. Следует выделить достаточно быстрое технологическое развитие инженерной геодезии, где активно внедряется лазерное сканирование, широко применяются беспилотные летательные аппараты, дистанционное зондирование Земли с применением космических спутников. Внедрение компьютерных технологий позволяет создавать трехмерные высокоточные трехмерные модели рельефа местности. Происходит интенсивное развитие методов проведения геодезических работ, а также технологий хранения информации. И вместе с тем следует отметить, что не всегда новые технологии отражены в действующих нормативных документах.

Многие проблемные вопросы инженерно-геодезических изысканий связана с ценообразованием этих работ. Существующие на сегодняшний день расценки не позволяют изыскательским организациям заниматься развитием собственных производственных мощностей, привлекать к работе опытных (а значит, высокооплачиваемых) специалистов.

Также проблемным вопросом являются сжатые сроки работ по инженерно-геодезическим изысканиям, которые устанавливаются заказчиками.

Пока имеются и многие другие проблемные вопросы, требующие решения:

- выросла доля лиц пенсионного возраста с увеличением дефицита молодых специалистов и разработчиков нормативных технических документов;
- низкий уровень финансирования Росстандартом разработки нормативных технических документов;
- ускоряющееся развитие сферы инженерно-геодезических изысканий, включая технологии их автоматизации и компьютеризации, требует от специалистов непрерывного самообучения;
- нормативная база в части инженерно-геодезических изысканий пока отстает от уровня развития многих передовых стран;
- существовавшая ранее нормативно-правовая система, была практически разрушена, а создание новой совпало с кризисом системы высшего специального и профессионального среднего технического образования, вызванным практически полным отсутствием финансирования и кадровым дефицитом в нормативных институтах и отрасли инженерных изысканий;
- инженерно-геодезические изыскания характеризуются высокой научностью, требуется развитие научных исследований по обработке и освоению огромного объема инженерно-геодезической информации и дистанционных данных на основе современных информационных технологий;
- отчетливо проявляется отставание в развитии отечественных технических средств и технологий для геодезических изыскательских работ от уровня, достигнутого зарубежными странами, по ряду направлений происходит замещение отечественного оборудования и технологий импортными;
- отсутствуют мотивационные стимулы и недостаточный имидж профессии инженера-геодезиста, что приводит к преобладанию специалистов предпенсионного и пенсионного возраста в области инженерно-геодезических изысканий;

– не находят использования результаты городских геодезических сетей, находящиеся в Федеральном фонде пространственных данных Росреестра и отсутствуют нормативные решения по их использованию в процессе инженерно-геодезических изысканий;

– к проблеме нормативного обеспечения следует отнести и отсутствие требований к получению крупномасштабных ортофотопланов, получаемых с использованием беспилотных летательных аппаратов [3].

Следует отметить, что разработка новых нормативных документов выполняется без проведения целевых научных и методических исследований по практической технологической проверке их применения. К сожалению, отсутствует и научная программа в сфере технического регулирования инженерно-геодезических изысканий. В целом в настоящее время могут быть предложены следующие перспективные направления развития технического регулирования инженерно-геодезических изысканий (рис. 5).

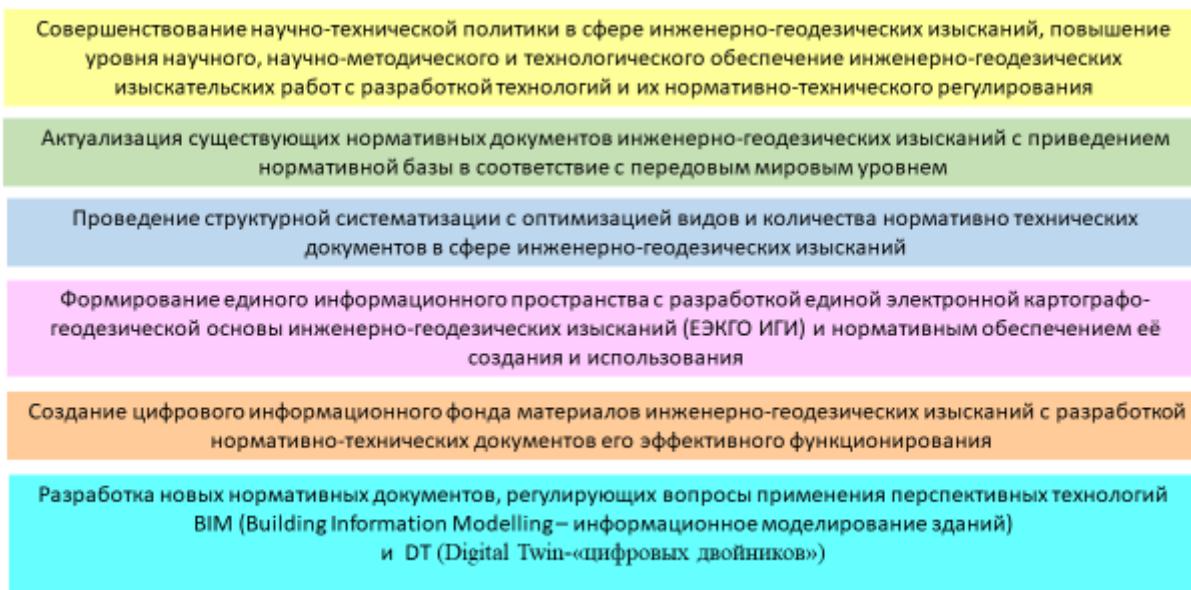


Рис. 5. Перспективные направления развития технического регулирования инженерно-геодезических изысканий

Из перспективных направлений развития значительное внимание за рубежом уделяется вопросам разработки и применения BIM-технологий и цифровых двойников. При этом зарубежные специалисты заявляют о том, что эпоха BIM-моделирования подходит к концу, а на смену ей приходит новейшая технология цифровых двойников. BIM фиксирует конкретные моменты жизненного цикла местности и объекта, но не дает возможности отследить, какие изменения были внесены в результате воздействия различных факторов на местность или объект.

BIM фокусируется на проектировании здания. Цифровой двойник – это симуляция того, как специалисты взаимодействуют со своим окружением в процессе строительства и эксплуатации здания или сооружения. Представляется неверным использовать технологию BIM как цифровое физическое пространство объекта. BIM позволяет создать качественный проект объекта, а цифровую копию реализованного физического объекта и его местоположения позволяет смоделировать цифровой двойник [3].

С помощью цифровых двойников можно построить модель будущего здания или целого квартала и спрогнозировать, как оно впишется в среду, выдержит климатические условия и нагрузки на несущие конструкции. Результаты исследований по применению цифровых двойников представлены во многих публикациях. Наиболее детально применение цифровых двойников в строительной отрасли изложено в статьях [2, 4]. В этих публикациях отмечено, что в середине сентября 2021 г. Россия первой в мире утвердила стандарты в области цифровых двойников. Соответствующий документ, утвержденный Росстандартом и введенный в действие 1 января 2022 г., получил название «Численное моделирование» – ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники продуктов. Общие положения» [1].

Геоинформационную основу цифрового двойника территории составляют планово-высотное обоснование местности с трехмерными моделями рельефа, включая антропогенную информацию, данные дистанционного зондирования Земли, изображения и информация от различных датчиков сканирования окружающей среды и информационных источников. Основные геоинформационные слои цифрового двойника и пример их использования в городском планировании представлены на рис. 6.

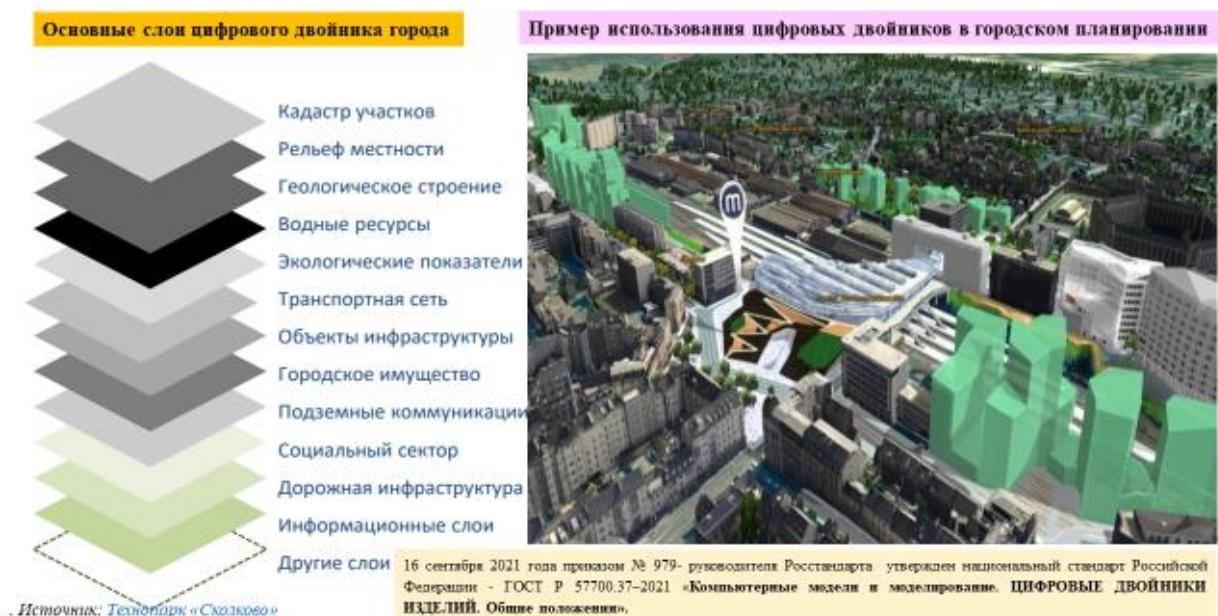


Рис. 6. Основные геоинформационные слои цифровых двойников и их использование в городском планировании

Представляется необходимым проведение дополнительных научных и методических исследований по разработке нормативных документов технического регулирования создания и практического использования цифровых двойников в сфере инженерных изысканий, включая инженерно-геодезические изыскания.

В заключение следует отметить, что в целях совершенствования нормативно-технической работы в системе инженерных изысканий в строительстве, необходима реализация рассмотренных перспективных направлений, включая использование новых технологий моделирования строительных объектов.

### **Список литературы**

1. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники продуктов. Общие положения.
2. Изряднова А.И., Целищева П.А., Бегунова Н.В. Цифровые двойники в современном строительстве: практика применения и перспективы использования // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Фотинские чтения – 2022». Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2022. С. 102–111.
3. Лисицкий Д.В., Осипов А.Г., Савиных В.Н. Цифровой двойник территории и методы геокогнитивного моделирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 1. С. 206–212.
4. Лысенко Д.А. Метод автоматизированной адаптации цифрового двойника объекта строительства // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 4(34). С. 139–141.
5. Портнов А.М. Современные проблемы реализации федерального государственного надзора в области геодезии и картографии в структуре территориальных органов Росреестра // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 4. С. 422–427.
6. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96».
7. СП 317.1325800.2017 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.

**V.A. Avdeev, L.I. Yablonskiy**

Scientific Geoinformation Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, mail@ngic.ru

**POSSIBLE PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF TECHNICAL  
REGULATION OF ENGINEERING-GEODESIC SURVEYS  
IN CONSTRUCTION**

**Abstract.** The main composition of types of works and documents of technical regulation of engineering-geodesic surveys in construction are considered. A selective list of regulatory and technical documents regulating engineering-geodesic surveys is presented. Currently existing problematic issues have been identified that affect the timeliness and quality of the development of regulatory documents. Promising directions for the development of technical regulation of engineering-geodesic surveys are proposed. One of the current promising directions of use in the process of engineering-geodesic surveys of modern BIM technologies and digital twins has been identified and considered. It is noted that in Russia, for the first time in the world practice of technical regulation, a standard in the field of digital twins has been approved and put into force since 2022. The need to conduct research on the development of technical regulation documents for the practical use of digital twins in the field of engineering surveys is shown.

**Key words:** engineering-geodesic surveys; regulatory documents; technical regulation; development prospects; digital twin.

**Волегжанин Д.Н.**

Сибирский филиал ФАУ «Главгосэкспертиза России», г. Омск, d.volegzhinan@gge.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ**

**Аннотация.** В публикации описываются требования к составлению отчетной документации по результатам инженерно-геодезических изысканий, полученным с использованием инновационных технологий цифровой аэрофотосъемки, фотограмметрической обработки цифровых снимков, лазерного сканирования.

**Ключевые слова:** инженерно-геодезические изыскания; инновационные технологии; техническое регулирование; нормативная документация; отчетная документация.

План мероприятий [3] по использованию технологий информационного моделирования при проектировании и строительстве объектов капитального строительства, утвержденный Распоряжением Правительства РФ № 3719-р от 20.12.2021, вывел инновационные технологии, такие как цифровая аэрофотосъемка, фотограмметрическая обработка цифровых снимков, лазерное сканирование из ситуации, в которой они вынуждены были находиться из-за отсутствия какого-либо технического регулирования в этой области. Необходимо отметить, что грамотное квалифицированное использование этих технологий позволит вывести информационное моделирование на новый качественный уровень, особенно в части всевозможных видов мониторинга.

В развитие п. 1 плана мероприятий [3] Министром России утверждена «Методика определения нормативных затрат на информационное моделирование с учетом использования технологий лазерного сканирования и фотограмметрии» [2]. Наличие методики совместно с вновь разработанными нормативными техническими документами добровольного применения позволяет исполнителям инженерно-геодезических изысканий вполне легально выполнять работы с применением инновационных технологий, не «маскируя» их под тахеометрическую или RTK-съемку в отчетной документации.

В корректно составленной отчетной документации, содержащей материалы, полученные с применением инновационных технологий, должны содержаться следующие документы и сведения, наличие которых будет проверяться при прохождении государственной экспертизы результатов инженерно-геодезических изысканий [4]:

1. Сведения о нормативных технических документах, в соответствии с требованиями которых выполнены инженерно-геодезические изыскания.
2. Сведения о результатах метрологической поверки или калибровки использованных средств измерений.
3. Сведения о примененных методиках выполнения полевых и камеральных работ, в том числе расчетных.
4. Сведения об использованном программном обеспечении.

## 5. Сведения о проведении внутреннего и внешнего контроля качества работ.

Сведения о нормативных технических документах, в соответствии с требованиями которых выполнены инженерно-геодезические изыскания, должны быть отражены в разделах отчетной документации «Методика и технология выполнения работ» и «Использованные документы и материалы», а также в программе на проведение инженерных изысканий.

Кроме того, перечень этих документов должен быть приведен в задании на выполнение инженерно-геодезических изысканий. Это позволяет понять, что заказчик допускает применение инновационных методов при производстве работ и готов их оплачивать.

Сведения о результатах метрологической поверки или калибровки средств измерений приводятся в разделе «Методика и технология выполнения работ». Копии результатов метрологической поверки или калибровки (самокалибровки) средств измерений приводятся в составе приложений к отчетной документации.

Проверка систем лазерного сканирования осуществляется в соответствии с требованиями Федерального закона № 102-ФЗ от «26» июня 2008 г. «Об обеспечении единства измерений» [4].

Цифровые топографические аэрофотокамеры подлежат фотограмметрической калибровке [1] с периодичностью, рекомендуемой изготовителем, или указанной в технической документации, а также во всех случаях возникновения обоснованной необходимости проверки неизменности значений параметров фотограмметрической калибровки. В случае отсутствия таких рекомендаций в технической документации, периодичность калибровки определяется владельцем (эксплуатантом) аэрофотокамеры. Ответственность за достоверность параметров калибровки несет владелец (эксплуатант) аэрофотокамеры.

Для неметрических аэрофотокамер при отсутствии данных заводской фотограмметрической калибровки или данных о постоянстве значений элементов внутреннего ориентирования допускается использование самокалибровки аэрофотокамеры.

Сведения о применяемых методиках [4], в т.ч. и расчетных, приводятся в текстовой части отчетной документации в разделе «Методика и технология выполнения работ» с необходимой и достаточной подробностью, позволяющей оценить их применимость для получения результата, удовлетворяющего установленным требованиям. Допускается также приводить ссылки на методики, содержащиеся в иных документах. Иные документы следует приводить в составе приложений к отчетной документации.

Сведения об используемом программном обеспечении [4] приводятся в текстовой части отчетной документации в разделе «Методика и технология выполнения работ».

В техническом регламенте о безопасности зданий и сооружений [5] однозначно говорится о том, что результаты инженерных изысканий должны

быть достоверными и достаточными для установления проектных значений параметров и других проектных характеристик здания или сооружения, а расчетные данные в составе результатов инженерных изысканий должны быть обоснованы лицом, выполняющим инженерные изыскания.

Соответствие проектных значений параметров и других проектных характеристик здания или сооружения требованиям безопасности должны быть обоснованы ссылками на требования технического регламента и ссылками на требования стандартов и сводов правил, включенных в перечни обязательного или добровольного применения. В случае отсутствия указанных требований соответствие должно быть обосновано, в частности, расчетами или испытаниями, выполненными по сертифицированным или аprobированным иным способом методикам.

В данном случае речь идет о предоставлении в составе приложений к отчетной документации сертификата соответствия [6] используемых инновационных методик требованиям технического регламента [5]. Под термином «инновационная» здесь понимается методика, не описанная в нормативных технических документах, включенных в перечни обязательного или добровольного применения.

Ч. 7 ст. 15 технического регламента [5] распространяет требования ч. 6 ст. 15, в т.ч. и на результаты инженерно-геодезических изысканий.

В текстовой части отчетной документации раздел «Сведения о контроле качества и приемке работ» [4] должен содержать информацию о видах, методах и объемах выполненных контрольных измерений, об ответственных лицах – исполнителях работ по контролю и приемке, о результатах выполненного контроля и приемки. Данное требование относится не только к внутреннему контролю исполнителя, но и к внешнему контролю заказчика.

В п. 4.10 [4] говорится о том, что внешний контроль качества выполнения инженерных изысканий осуществляется заказчиком. Заказчик осуществляет контроль качества инженерных изысканий собственными силами или с привлечением независимых организаций. Задачей контроля качества со стороны заказчика является проверка соответствия выполненных или выполняемых исполнителем работ и их результатов требованиям задания, программы, нормативной документации.

Необходимо понимать, что на исполнителя задача проведения внешнего контроля не возлагается, необходимым, в данном случае, является приведение соответствующих сведений в отчетной документации и предоставление в составе приложений [4] документа, подтверждающего проведение внешнего контроля, с указанием полного перечня выполненных работ, с печатями и подписями представителей организаций заказчика и исполнителя.

Сведения о порядке проведения внешнего контроля [4] могут быть указаны также в задании на выполнение инженерных изысканий. В этом случае аналогичные сведения указываются и в программе проведения инженерно-геодезических изысканий. Необходимо отметить, что требования п. 4.19

распространяются только на состав и содержание программы, и никаким образом не связаны с требованиями п. 4.10.

Наличие сведений о проведении внешнего контроля позволяет судить об осведомленности заказчика относительно хода выполняемых работ, их видов и объемов, что играет важную роль при оценке их сметной стоимости и качества.

### Список литературы

1. ГОСТ Р 59328-2021 Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования.
2. Приказ Минстроя России № 221/пр от 30.03.2022 «Методика определения нормативных затрат на информационное моделирование с учетом использования технологий лазерного сканирования и фотограмметрии».
3. Распоряжение Правительства РФ № 3719-р от 20.12.2021 (в ред. Распоряжения Правительства РФ № 3766-р от 06.12.2022) «План мероприятий («дорожная карта») по использованию технологий информационного моделирования при проектировании и строительстве объектов капитального строительства, а также по стимулированию применения энергоэффективных и экологичных материалов, в том числе с учетом необходимости их производства в Российской Федерации».
4. СП 47.13330.2016. «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96».
5. Федеральный закон № 102-ФЗ от 26.06.2008 (ред. от 11.06.2021) «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 29.12.2021).
6. Федеральный закон № 184-ФЗ от 27.12.2002 (ред. от 02.07.2021) «О техническом регулировании» (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 23.12.2021).

**D.N. Volegzhannin**

Siberian Branch of the Main Department of State Expertise, Omsk, d.volegzhannin@gge.ru

## ON THE USE OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES DURING ENGINEERING-GEODESIC SURVEYS

**Abstract.** The article describes the requirements for the preparation of technical report based on the results of engineering-geodesic surveys obtained on the use of innovative technologies of digital aerial survey, photogrammetric processing of digital images, and laser scanning.

**Key words:** engineering-geodesic surveys; innovative technologies; technical regulation; regulatory documentation; technical report.

**Кукушкин Д.А., Галахов В.П.**

ООО «Геостройизыскания», г. Москва, zao@gsi.ru

## **АКТУАЛЬНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СПУТНИКОВЫХ ПРИЕМНИКАХ И МОБИЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРАХ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ**

**Аннотация.** С каждым годом совершенствуются приборы и программные продукты, применяемые в геодезии и маркшейдерии. Выпускаются новые решения, которые совмещают в себе несколько технологий, позволяя, тем самым, более эффективно использовать временные и трудовые ресурсы для выполнения широкого спектра задач. Особенно эти тенденции заметны в новых моделях спутниковых приемников геодезического класса, а также в системах лазерного сканирования.

**Ключевые слова:** спутниковая навигация; лазерное сканирование; SLAM; геопространственные данные; инженерно-геодезические изыскания; маркшейдерия; кадастровые работы.

Измерительное оборудование, применяемое в инженерно-геодезических изысканиях, кадастровых работах и при маркшейдерском обеспечении активно развивается. С каждым годом совершенствуются сами приборы, программные продукты, выпускаются новые решения, которые совмещают в себе несколько технологий, гибридизируются, позволяя, тем самым, более эффективно использовать временные и трудовые ресурсы. Особенно эти тенденции заметны в новых моделях спутниковых приемников геодезического класса, а также в системах лазерного сканирования.

За последние годы технология определения координат объектов с использованием приемников сигнала глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [2] прочно закрепилась в сфере проведения инженерно-геодезических изысканий. На сегодняшний день уверенно можно сказать, что ГНСС-приемники стали одним из основных рабочих инструментов для определения пространственных координат объектов земной поверхности. Следует отметить, что базовая технология спутниковой навигации достигла довольно высокого уровня и анализ новинок, выходящих на рынок, показывает, что дальнейший вектор развития сместился в сторону комбинированного использования нескольких сенсоров в одном устройстве. В качестве выразительного примера подобных устройств можно привести спутниковые приемники MARS и VENUS, которые появились на мировом рынке в 2023 г. под брендом SinoGNSS. В этих приемниках совмещены собственно ГНСС-приемник, инерциальная система и лазерный дальномер. ГНСС-модуль позволяет определить координаты фазового центра, блок инерциальных измерений позволяет определить пространственную ориентацию корпуса приемника, а лазерный дальномер, жестко закрепленный в корпусе и откалибранный относительно инерциальной системы и фазового центра

антенны, позволяет определить расстояние от приемника до поверхности объекта. Таким образом, восстановив пространственный вектор, можно получить координаты точки, на которую был наведен лазер. Приемник MARS имеет дальномер, закрепленный в боковой поверхности прибора и направленный в горизонтальной плоскости. А в приемнике VENUS дальномер встроен в основание корпуса прибора и направлен отвесно вниз.

Приведены несколько примеров эффективного использования новых приборов. В городской застройке из-за значительного закрытия небосвода зданиями и сооружениями, а также из-за эффекта переотражения спутникового сигнала от поверхности окружающих объектов, происходит снижение точности и надежности решения, особенно при выполнении измерений в непосредственной близости от них. Используя приемник с инерциальной системой и дальномером, можно отойти от здания в место, где прием сигналов достаточно устойчив, и произвести определение координат необходимой точки, направив на нее лазер дальномера. В таких случаях оптимальным выглядит применение приемника MARS (рис. 1). В качестве основной сферы применения приборов серии MARS можно выделить выполнение топографических съемок при проведении инженерно-геодезических изысканий, а также выполнение кадастровых работ.



Рис. 1. SinoGNSS MARS. Пример использования

Необходимо отметить, что на данный момент максимальное рабочее расстояние от прибора до объекта ограничено 15 м. Именно на такой дистанции совокупная погрешность спутникового приемника, инерциального модуля и лазерного дальномера остается в пределах требований, предъявляемых к качеству топографической съемки при проведении изысканий [4, 5]. Можно предположить, что в дальнейшем будет увеличиваться точность измерений и, как следствие, максимальное удобство рабочего расстояния.

Помимо съемки ГНСС-приемники традиционно также решают задачу выноса в натуру. Очевидно, что для выноса в натуру удобнее использовать прибор с дальномером, направленным вниз, чтобы выносимая точка фиксировалась лазером на поверхности под прибором. В дополнении к этому даже при выполнении съемки ряд объектов значительно удобнее снимать с

помощью дальномера, направленного вниз (съемка профиля траншеи, дна колодца, съемка нижней бровки откоса, съемка мостовых опор или иных подобных труднодоступных объектов (рис. 2). Именно для решения подобных задач был создан прибор SinoGNSS VENUS.



Рис. 2. SinoGNSS Venus. Пример использования

Таким образом, к основным сферам применения прибора SinoGNSS VENUS можно отнести топографическую съемку, выполнение разбивочных работ, маркшейдерские работы на открытых складах или месторождениях полезных ископаемых, различные виды специализированных съемок, например, исполнительные съемки плана и профиля прокладываемых трубопроводов или кабелей.

Новый вектор развития в сторону интеграции нескольких устройств в одно наметился не только у приемников ГНСС, но и в лазерных сканирующих системах. Их развитие привело к появлению нового класса «гибридных» приборов – быстрых, легких и компактных лазерных сканеров, интегрированных с дополнительными устройствами (блок инерциальных измерений, ГНСС-приемник, фотокамера). Эти приборы характеризуются относительно малым весом, сравнительно высокой точностью измерений, а также высокой скоростью получения результата сканирования после завершения работы. Например, при сканировании объекта в течении 30 мин, пройдя при этом расстояние около 2,5 км и отсканировав около 12 га площади, первичные данные можно получить уже через 45 мин после завершения сканирования.

Представлено рассмотрение современных ручных сканеров на примере GOSLAM RS100S [3]. Сканер GOSLAM RS100S включает в себя сам сканер, блок инерциальных измерений, блок управления, в роли которого может выступать мобильный телефон или планшет (он не обязателен, но повышает удобство работы), блок питания, соединительные элементы и накопитель данных с процессором для выполнения первичной обработки полученных результатов сразу после завершения сканирования (рис. 3).



Рис. 3. Мобильный лазерный 3D-сканер GOSLAM RS100S в сборе

Обработка данных в современных мобильных ручных лазерных сканерах реализована по технологии Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) [6], т.е. программное обеспечение целенаправленно выбирает одни и те же элементы в разных «блоках» облаков точек и совмещает их последовательно друг с другом. Предварительное ориентирование облаков точек происходит за счет модуля инерциальных измерений, встроенного в сканер. Безусловно, для наиболее устойчивой и корректной работы алгоритма необходимо соблюдать методику выполнения полевых работ [3].

Комплекс ручного сканера может дополняться фотокамерой высокого разрешения, а также спутниковым приемником. Применение сканера в связке с ГНСС-приемником значительно повышает надежность расчета траектории движения, а также позволяет получать облака точек в необходимой системе координат без дополнительных операций.

В 2023 г. прибор успешно прошел сертификационные испытания и был внесен в реестр средств измерений [7], что способствовало его более широкому внедрению.

Показаны несколько примеров эффективного применения ручного мобильного лазерного сканера GOSLAM RS100S. При выполнении маркшейдерских замеров GOSLAM RS100S позволяет выполнить съемку с высокой скоростью, надежностью и безопасностью для исполнителя, т.к. измерения производятся дистанционно вне зоны возможной оползневой активности. При этом максимальное удобство работы достигается в случае применения крепления сканера рюкзачного типа в комбинации с приемником ГНСС.

На рис. 4 приведен результат сканирования карьера. Размер карьера составлял порядка 300 м в ширину и 400 м в длину с глубиной выработки на данном этапе не более 30 м. Сканирование всего объекта было выполнено за 20 мин. По завершению работы данные в местной системе координат были получены уже через 25 мин.

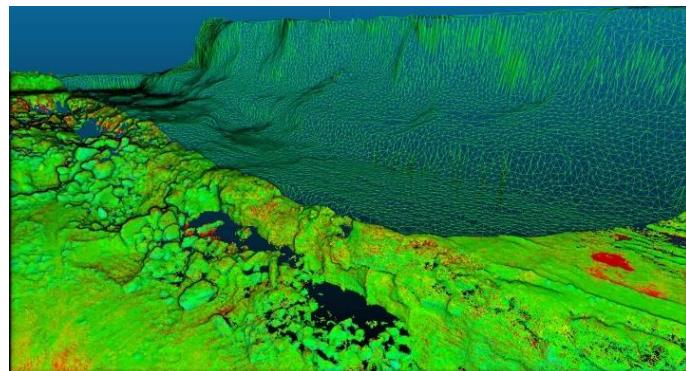


Рис. 4. Облако точек и триангуляционная модель части карьера

Еще одним актуальным примером эффективного использования ручных мобильных сканеров является съемка закрытых месторождений полезных ископаемых – подземных выработок, а также съемка тоннелей и иных подземных сооружений. В таких условиях комплекс GOSLAM RS100S работает, ориентируясь исключительно на работу SLAM-алгоритма. Опытная эксплуатация показала, что прибор успешно справляется с поставленной задачей даже в довольно сложных условиях – в извилистых тоннелях со значительными перепадами высот. Привязка данных в систему координат рудника при этом выполняется по опорным точкам. Результат сканирования подземной выработки представлен на рис. 5. В наборе данных присутствует исчерпывающая информация не только о самой выработке, но и о расположенных внутри выработки объектах.



Рис. 5. Результат сканирования подземной выработки

На сегодняшний день для сканирования архитектурных объектов и объектов культурного наследия также применяются ручные мобильные сканеры. Так, на сканирование фасадов памятника архитектурного наследия, приведенного на рис. 6, было потрачено около 8 мин. Первичная постобработка данных заняла порядка 20 мин.



Рис. 6. Облако точек, окрашенное в естественные цвета

Мобильные ручные сканеры можно эффективно применять и для выполнения инженерно-геодезических изысканий. Развитие программного обеспечения с каждым годом делает этот процесс проще и производительнее. В качестве примера на рис. 7, *а* приведена съемка фрагмента городской территории и лесного массива. На сканирование затрачено около 25 мин с охватом площади порядка 7 га.

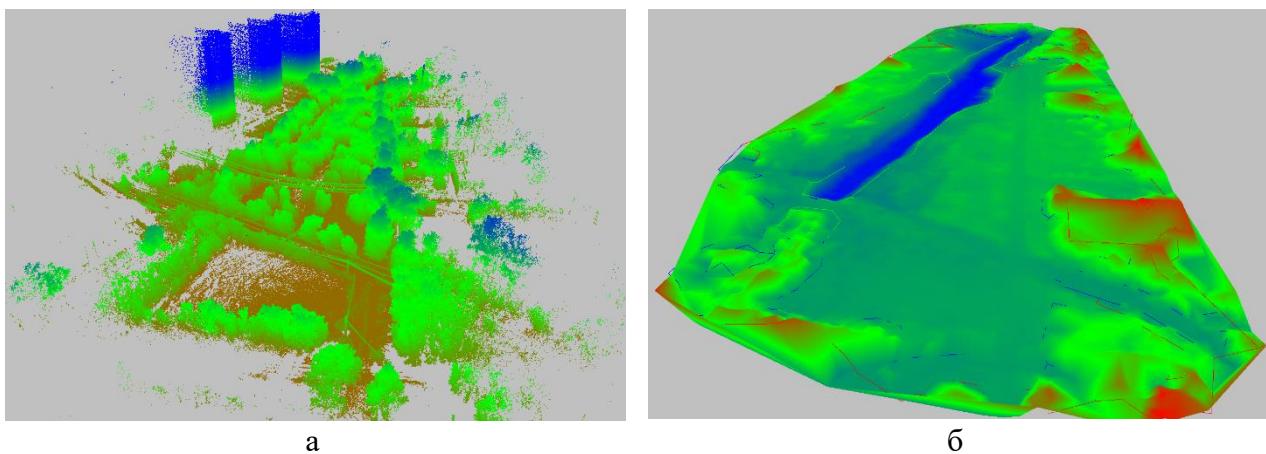


Рис. 7. Пример съемки городской территории

На обработку затрачено приблизительно 1 ч рабочего времени. При этом использовано программное обеспечение GOSLAM Studio, которое входит в комплект сканера, а также российский программный комплекс КРЕДО 3Д СКАН. На рис. 7, *б* приведена автоматически полученная цифровая модель местности. Помимо автоматического извлечения модели рельефа в современных программных решениях автоматизированы и такие процессы как распознавание точечных и линейных объектов. В совокупности с интерактивными инструментами по редактированию данных это позволяют создавать как традиционные топографические планы и чертежи, так и полноценные цифровые модели местности для дальнейшего их применения в процессе развивающейся технологии информационного моделирования [1].

Необходимо отметить, что логичный и во многом универсальный алгоритм работы и компактные размеры сделали ручной сканер максимально универсальным – пользователи не только выполняют сканирование в ручном режиме, но и закрепляют этот прибор на квадрокоптеры, роботизированные платформы, автомобили, квадроциклы и другие легкие транспортные средства для выполнения сканирования на сложных участках, труднодоступных для пеших исполнителей.

Несмотря на широкое внедрение ГНСС-приемников и развитие технологии лазерного сканирования, традиционные оптико-электронные приборы по-прежнему востребованы. Они прочно занимают свою нишу, являясь пока незаменимыми помощниками строителей и маркшейдеров. В отдельных случаях и при выполнении инженерно-геодезических изысканий им трудно найти замену. Электронные тахеометры также продолжают развиваться и на сегодняшний день пользователям доступны различные модели, как в самом простом исполнении, так и с операционной системой Windows на борту, от простых до роботизированных и даже комбинированных с ГНСС-приемниками или лазерными сканерами. Пример современных электронных тахеометров представлен на рис. 8.



Рис. 8. Электронные тахеометры VEGA серии NX40, NX50 и NX60

ООО «Геостройизскания» приглашает заинтересованных специалистов к более широкому обсуждению затронутых в публикации вопросов.

### Список литературы

1. Алексеев М.Д., Глейзер В.И., Галахов В.П. Роль геодезических средств измерений в BIM-технологии // Геопрофи. 2020. № 6. С. 27–30.
2. ГКИИП (ОНТА)-02-262-02 Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS.
3. Кукушкин Д.А., Галахов В.П., Талтыкин В.В. Практический опыт применения технологии SLAM на базе лазерного сканера GOSLAM в строительстве и маркшейдерии // Сборник научных трудов

«Инновационное развитие землеустройства». Кинель: ИБЦ Самарского ГАУ, 2023. С. 94–101.

4. СП 47.13330.2016. «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96».
5. СП 317.1325800.2017 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
6. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I // IEEE Robotics Automation Magazine. 2006. Vol. 13. No. 2. P. 99–110. <https://doi.org/10.1109/MRA.2006.1638022>.
7. Сканеры лазерные мобильные GOSLAM. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://all-pribors.ru/opisanie/88193-23-goslam> (дата обращения: 29.10.2023).

**D.A. Kukushkin, V.P. Galakhov**

Geostroyizyskaniya LLC, Moscow, kd@gsi.ru

## **ACTUALITY AND PROSPECTS OF USING ADVANCED TECHNOLOGIES IN GNSS RECEIVERS AND MOBILE LASER SCANNERS FOR ENGINEERING-GEODESIC SURVEYS**

**Abstract.** Surveying and mining equipment and software are improving every year. New solutions are being released which combine several technologies, thereby allowing more efficient use of time and human resources to perform a wide range of tasks. These trends are especially notable in new models of GNSS receivers and laser scanning systems.

**Key words:** satellite navigation; laser scanning; SLAM; geospatial data; engineering-geodesic survey; mining survey; cadastral works.

**Смирнов Е.А., Дмитриев В.Е., Румянцева А.А., Чибуничев И.А.**

МИИГАиК, геодезический факультет, кафедра фотограмметрии, г. Москва, smirnov.e.a@list.ru

## **СОЗДАНИЕ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЦМР, ПОСТРОЕНОЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

**Аннотация.** В представленной работе выполнено построение и оценка точности цифровых моделей рельефа (ЦМР) территории Заокского геополигона МИИГАиК в Тульской области двумя методами: фотограмметрическим и по данным воздушного лазерного сканирования (ВЛС). Точность оценена по контрольным точкам на всей площади съемки и по высотным пикетам на небольшом контрольном участке. В ходе эксперимента подтверждена объективность оценки точности ЦМР по равномерно расположенным контрольным точкам. Точность ЦМР, построенной фотограмметрическим методом, составила 9,8 см в среднем по всей площади и 10,1 см на контрольном участке; по данным ВЛС – 15,3 и 11,7 см соответственно.

**Ключевые слова:** аэрофотосъемка; фотограмметрия; воздушное лазерное сканирование; геодезия; цифровая модель рельефа.

### *Введение*

Результаты фотограмметрической обработки данных аэросъемки с беспилотных воздушных судов давно и успешно применяется при создании цифровых моделей рельефа (ЦМР). Альтернативной технологией получения этого же продукта является воздушное лазерное сканирование. Эти методы дистанционного зондирования Земли предпочтительнее традиционной инструментальной съемки из-за их эффективности, информативности и экономичности при работе на больших площадях и в труднодоступных районах. Помимо задач картографирования, ЦМР находят широкое применение в таких областях, как строительство, добывающая промышленность, сельское хозяйство, геология и др. Технологии лазерного сканирования и фотограмметрической обработки обладают своими преимуществами и особенностями, однако, главным критерием выбора является точность, с помощью которой возможно получить выходной продукт. В данной работе проведена оценка данного параметра двумя способами: 1) всей матрицы по равномерно распределенным по площади пикетам; 2) небольшого участка матрицы с высокой плотностью покрытия пикетами.

### *Материалы и методы*

#### **Характеристика объекта**

Местом проведения работ стал специализированный исследовательский полигон на базе Заокского геополигона МИИГАиК в Тульской области. Инфраструктура полигона позволяет наиболее полно оценить точности

выходных продуктов. Вся его территория покрыта плотной сетью маркированных опорных точек. Ежегодно проводится восстановление утраченных, перенаблюдение и закладка новых пунктов [1].

В качестве контрольной информации в данном исследовании использовались, помимо уже существующих пунктов, высотные пикеты, снятые на открытой местности студентами в ходе полевых работ в октябре 2023 г. на северной окраине пос. Маяк.

Съемочное обоснование создано по методу глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) наблюдений в режиме короткой статики, 15–20 мин на станции. Удаление от базовой станции 1 км. Всего определено 4 пункта с прямой видимостью между соседними точками, расстояние между которыми 200–300 м. Наблюдения выполнялись двухчастотными приемниками TOPCON. Обработка наблюдений выполнена в программе PINNACLE. Точность полученных точек съемочного обоснования 2–3 см в плане и по высоте. С точек съемочного обоснования выполнена съемка пикетов с плотностью 10–15 м на открытых участках местности (дороги, бетонные площадки). Съемка выполнена полярным способом тахеометром TRIMBLE M3. Всего определены координаты и высоты 67 точек.

### ***Сбор и обработка данных***

#### ***Лазерный сканер АГМ-МС1 (Геоскан 401)***

В табл. 1 приведены основные технические характеристики сканера АГМ-МС1.

Таблица 1  
Технические характеристики сканера АГМ-МС1

Характеристика	Значение
Частота сканирования, кГц	300
Максимальная дальность, м	200
Угол поля зрения, град	360
Доверительные границы (дов. вер. 0,67) определения координат в плане и по высоте, мм	$15 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot L$ , где $L$ – измеряемое расстояние, мм (90 мм при высоте 150 м)
Вес, кг	1

Съемка проводилась осенью 2021 г. специалистами компаний «Геоскан», «АГМ СИСТЕМЫ» и сотрудниками МИИГАиК [2]. Работы выполнялись с использованием одной наземной базовой станции. Общая площадь съемки составила 1,4 км<sup>2</sup> (70 млн точек). Высота полета – 140 м. Средняя плотность облака – 25 т/м<sup>2</sup>. На рис. 1 представлено исходное облако точек.

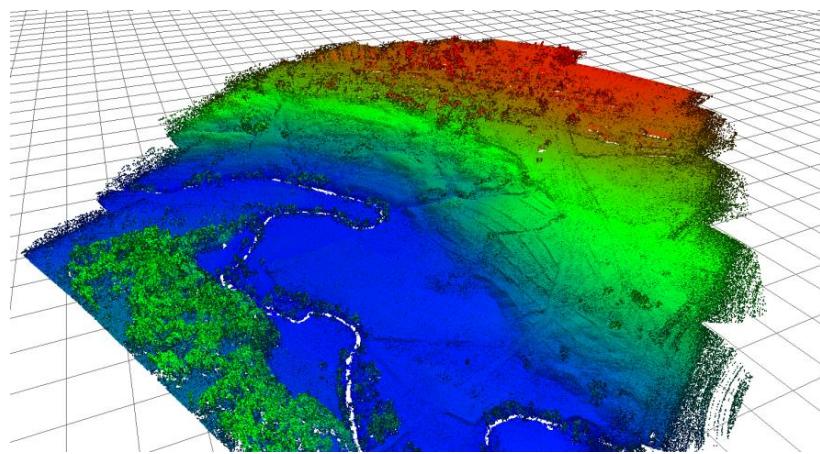


Рис. 1. Исходное облако точек, раскрашенное по высоте

Обработка облака точек выполнялась в программной системе ТИМ КРЕДО 3Д СКАН 1.9 и включала в себя такие этапы, как: расчет нормалей, фильтрация изолированных точек, автоматическая классификация рельефных точек с ручным редактированием и построение цифровой модели рельефа. Из 70 млн точек в класс «Земля» было выделено 3 млн (4,3%). После классификации средняя плотность облака снизилась до 2 т/м<sup>2</sup>. По «рельефным» точкам построена матрица высот с шагом 0,5 м. На рис. 2 представлена матрица, полученная по данным воздушного лазерного сканирования (ВЛС). Белые точки – контрольные, в количестве 45 шт., использовались для оценки точности всей ЦМР. Желтый участок – область исследований для сравнения. Зеленые точки – новые высотные пикеты, измеренные в октябре 2023 г., использовались для оценки точности матрицы на область исследования.

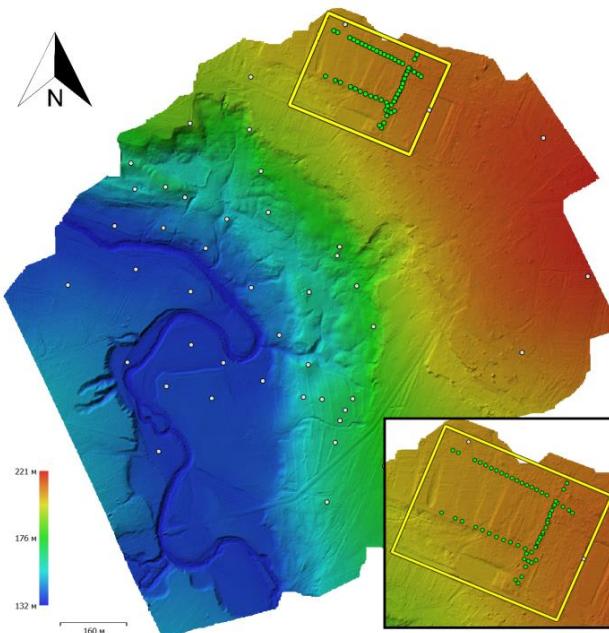


Рис. 2. Матрица высот, полученная по данным ВЛС (шаг 0,5 м)

### *Фотокамера Sony ZV-E10 (Supercam S350F)*

Съемка производилась в августе 2023 г. с целью оценки качества картографических материалов, получаемых данным программно-аппаратным комплексом на базе беспилотного воздушного судна Supercam S350F. Технические характеристики комплекса приведены в табл. 2. Залеты выполнены на высоте 150 м по направлению «восток–запад, запад–восток» с использованием наземной станции GPS/ГЛОНАСС Javad TRIUMPH-1. Общее число снимков в блоке – 1226. Уравнивание данных ГНСС с целью получения высокоточных координат центров проекции снимков выполнено с помощью программного обеспечения Justin.

Таблица 2  
Технические характеристики комплекса Supercam S350F

Характеристика	Значение
Фокусное расстояние камеры, мм	20
Размер матрицы, мм	23,5×15,6
Скорость полета, км/ч	65–120
Высота полета, м	150–5000

Фотограмметрическая обработка материалов съемки выполнялась в программном комплексе цифровой фотограмметрической станции (ЦФС) Metashape 1.7. В качестве геодезического обоснования при уравнивании использованы высокоточные центры фотографирования и 3 наземных опознавателя. В табл. 3 и на рис. 3 представлено расположение и среднеквадратические ошибки на опорных и контрольных точках после уравнивания. Плотное облако точек классифицировалось встроенными инструментами. На всю площадь съемки была построена цифровая матрица рельефа с шагом 11 см и ортофотопланы с разрешением на местности 3 см (рис. 4).

Таблица 3  
Среднеквадратические ошибки (СКО) по опорным и контрольным точкам после уравнивания

	Кол-во, шт.	Ошибка <i>X</i> , см	Ошибка <i>Y</i> , см	Ошибка <i>Z</i> , см	Ошибка <i>XY</i> , см	Общая ошибка, см
Опорные точки	3	1,3	2,4	4,3	2,7	5,1
Контрольные точки	42	1,3	1,5	6,9	2,0	7,2

### *Оценка точности ЦМР*

Оценка точности производилась в ЦФС Photomod 7. Вычислялись средние квадратические, средние и максимальные ошибки. В табл. 4 приведены статистические оценки для полных матриц и для контрольного участка.

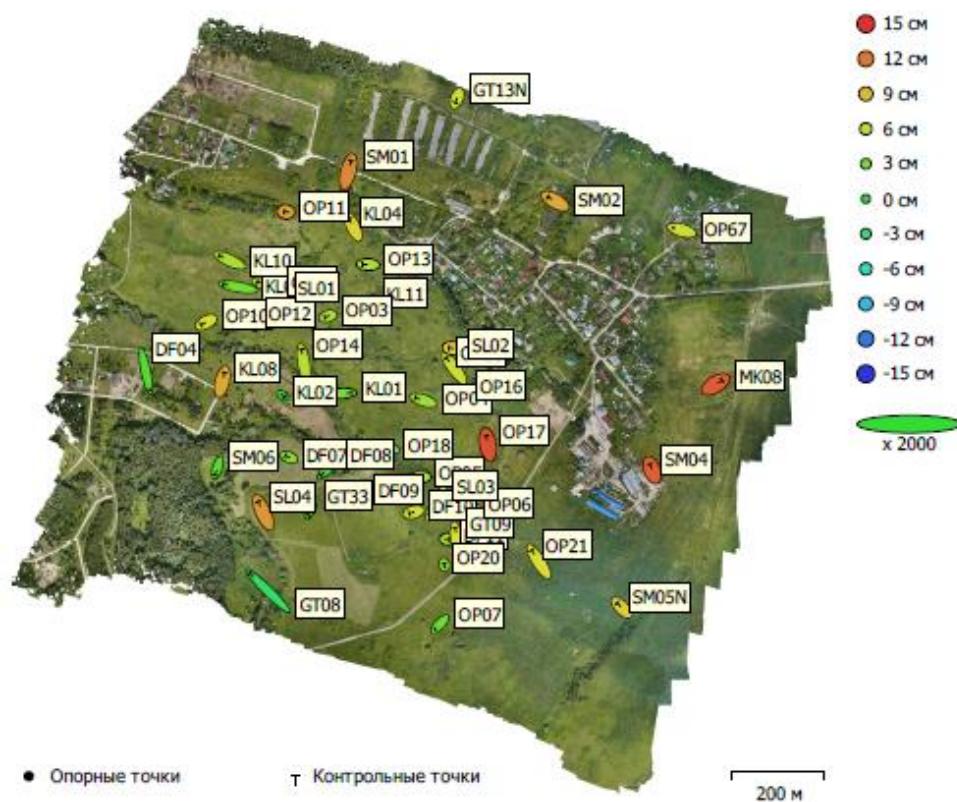


Рис. 3. Положение опорных и контрольных точек и оценка ошибок

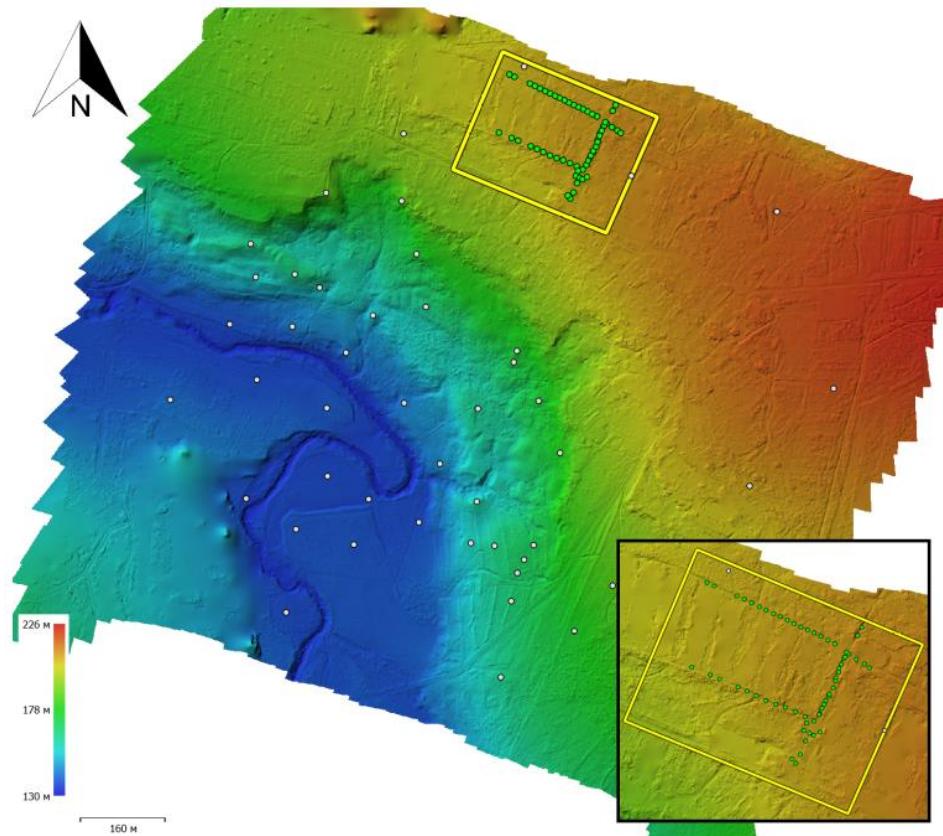


Рис. 4. Матрица высот, полученная фотограмметрическим методом (шаг 0,11 м)

Таблица 4  
Сравнение точности ЦМР, полученных по двум технологиям

Метод	Полная матрица (по 46 точкам)			Контрольный участок (по 60 пикетам)		
	СКО, см	Средний модуль, см	Максимум, см	СКО, см	Средний модуль, см	Максимум, см
Воздушное лазерное сканирование	15,3	12,5	-28,5	11,7	10,0	-28,9
Фотограмметрический	9,8	8,3	-22,0	10,1	9,4	-19,4

### *Результаты*

Анализ результатов показал, что:

- оценка матриц высот, полученных на полигоне, по равномерно распределенным контрольным точкам в целом объективна. Результаты были подтверждены по данным на контрольном участке;
- фотограмметрический метод и технология ВЛС показали практически идентичные результаты на контрольном участке по высотным пикетам, что подтвердило авторские ожидания;
- точность полной матрицы высот, полученной фотограмметрическим методом, несколько выше, чем матрицы, построенной по точкам лазерного отражения. Предположительно это связано с двумя факторами: 1) каталог опорных точек сети обновился в 2023 г., 2) авторам достоверно не известно, как выполнялось уравнивание облаков точек в зоне перекрытия соседних маршрутов.

### *Заключение*

В ходе данной работы была проведена оценка качества материалов на территорию Заокского геополигона по новым контрольным пикетам. В дальнейшем планируется продолжить сгущение сети контрольных точек. Для более объективного сравнения планируется выполнить одновременную съемку новым сканером – АГМ-МС3 – и цифровой фотокамерой.

### **Список литературы**

1. Курков В.М., Смирнов А.В., Иноземцев Д.П. Опыт использования бла при проведении практики студентов на «Заокском геополигоне» МИИГАИК // Геопрофи. 2014. № 4. С. 55–61.
2. Опыт применения комплекса «Геоскан 401 Лидар» в качестве беспилотной топографической системы воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки / М.В. Курков, Д.А. Клестов, В.А. Брусило, В.М. Курков, А.С. Киселева // Геопрофи. 2021. № 6. С. 17–23.

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

**E.A. Smirnov, V.E. Dmitriev, A.A. Rumiantseva, I.A. Chibunichev**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, smirnov.e.a@list.ru

**CREATION AND EVALUATION OF THE ACCURACY OF THE DTM,  
BASED ON THE MATERIALS OF AIRBORNE LASER SCANNING  
AND PHOTOGRAMMETRIC METHOD**

**Abstract.** In this publication, the construction and the evaluation of accuracy of digital terrain models (DTM) on the territory of the “Zaoksky geopolygon” of the Moscow State University of Geodesy and Cartography (Tula Region) is carried out by two methods: photogrammetric and according to airborne laser scanning (ALS) data. The accuracy was estimated by reference points on the entire survey area and by high-altitude pickets on a small control area. During the experiment, the objectivity of the estimation of the DTM's accuracy by evenly spaced control points was confirmed. The accuracy of the DTM constructed by the photogrammetric method was 9.8 cm over the entire area and 10.1 cm in the control area; according to the ALS data – 15.3 and 11.7 cm, respectively.

**Key words:** aerial photography; photogrammetry; airborne laser scanning; geodesy; digital terrain model.

**Веселов В.В.**

АО «Атомэнергопроект», г. Москва, Veselov\_VV@aep.ru

## **О ПОГРЕШНОСТЯХ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы проведения геодезического мониторинга промышленных и гражданских зданий и сооружений. Показано, что, в условиях строительства, сложных производственных условиях эксплуатации, при больших объемах наблюдений, расчет параметров деформаций при помощи геодезических измерений может быть значительно упрощен без потери достоверности и уточнен, за счет применения эквивалентных формул.

**Ключевые слова:** деформации; нивелирование; геодезические сети; устойчивость; опорный знак; превышение.

Оценивание параметров деформаций зданий и сооружений геодезическими методами определено требованиями СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83» [5]. В практике расчет наблюдаемых параметров деформаций выполняется по вертикальным смещениям координированных деформационных марок относительно, принятого за исходный, репера с неизменной высотой. Основные формулы для расчета параметров деформаций приведены в [7, 8], где основой для расчетов являются высоты или вертикальные смещения деформационных марок.

Как показала практика, такой подход оправдывает себя для простых по построению, небольших по количеству ходов геодезических сетей, не ограниченных сложными техногенными условиями строительства или эксплуатации. Например, когда сеть деформационных марок размещена по внешнему периметру сооружения без ограничений к установке геодезических приборов и инструментов, а опорные знаки расположены на расстоянии 100–150 м в зоне прямой видимости.

В более сложных случаях, например, в процессе строительства, подход с использованием высот деформационных марок при геодезическом мониторинге требует тщательной проработки и дополнительных расчетов.

Это связано, прежде всего, с тем, что по условиям строительства (загруженность машинами, механизмами, вспомогательными строительными конструкциями, отсутствие видимости, механические и иные повреждения знаков и пр.) геодезисты вынуждены изменять ранее проектную систему измерений, включать деформационные марки в нивелирные ходы по опорной сети, осуществлять привязки не к знакам опорной сети (по различным причинам), а к временным знакам или деформационным маркам соседних сооружений. Все это может уменьшать достоверность оценок параметров деформаций, искажая их.

Как оказывается, в таких случаях можно корректно упростить расчеты параметров деформаций и увеличить их достоверность.

Рассмотрено известное эквивалентное соотношение, используемое при определении осадки сооружений методом высокоточного нивелирования в геодезическом мониторинге:

$$\Delta h_{i,j,t} = h_{i,j,t} - h_{i,j,0} = \Delta H_{j,t} - \Delta H_{i,t} = H_{j,t} - H_{j,0} - H_{i,t} + H_{i,0},$$

где  $h_{i,j,t}$  и  $h_{i,j,0}$  – превышение между  $i$ -ой и  $j$ -ой деформационными марками в  $t$  и  $t = 0$  циклы измерений;  $\Delta H_{j,t}$  и  $\Delta H_{i,t}$  – вертикальные смещения  $i$ -ой и  $j$ -ой деформационных марками в  $t$  и  $t = 0$  циклы измерений;  $H_{j,t}$ ,  $H_{j,0}$ ,  $H_{i,t}$ ,  $H_{i,0}$  высоты  $i$ -ой и  $j$ -ой деформационных марками в  $t$  и  $t = 0$  циклы измерений.

Отличительная особенность этих эквивалентных формул в том, что погрешности определения высот и превышений не сопоставимы за счет различий при назначении веса измерения. Так, при использовании высот (или вычисленных вертикальных смещений по высотам), полученные значения зависят от устойчивости опорной сети. При использовании превышений, количество измерений может быть во много раз меньше, как соответственно и погрешность их измерения.

Для пояснения показан пример в виде графиков изменений одного превышения, полученного непосредственно после наблюдения и после уравнивания (рис. 1).

На рис. 1 приведены графики изменения превышений между парой соседних марок, заложенных в фундаментную плиту. Нивелирование выполнялось в период строительства высокоточным цифровым нивелиром с комплектом инвариных кодовых реек с частотой 1 раз в месяц. Здесь же на рис. 1 приведен ориентировочный график загрузки фундаментной плиты надфундаментными постройками в процентах относительно полного проектного веса сооружения, принятого при проектировании.

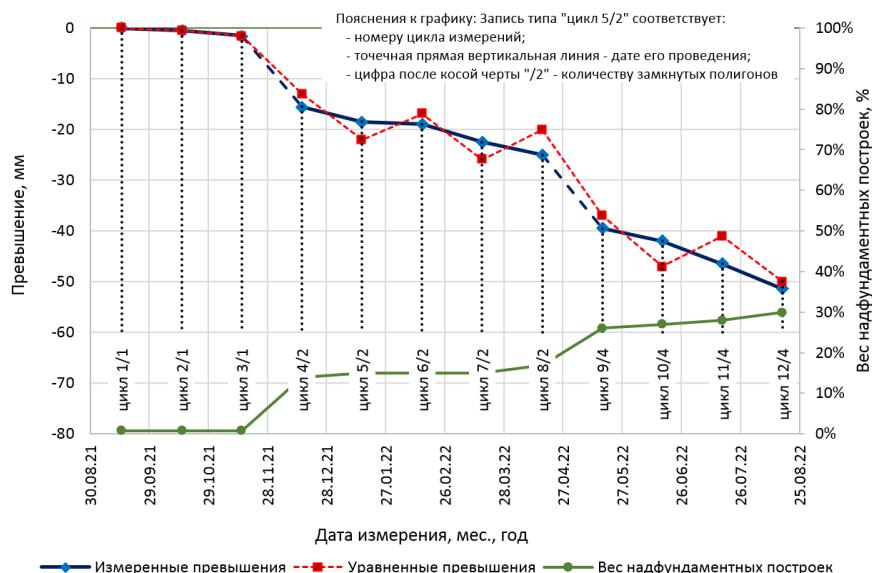


Рис. 1. График измеренных и уравненных превышений

Первоначально (циклы 1–3) схема сети была простейшей, включая в себя 16 деформационных марок, размещенных на прямоугольной фундаментной плите размерами 78×84 м и объединенных нивелирными ходами в виде замкнутого полигона из 18 штативов. Между соседними марками была прямая видимость. В циклах 4–8 были частично возведены надфундаментные строительные конструкции и поэтому, при нивелировании схема включала в себя уже 2 полигона, развитых из-за фрагментарного отсутствия видимости между марками. В циклах 9–12 (см. рис. 1) количество полигонов уже стало равно 4.

Как видно из этих, графиков более стабильным является график измеренных превышений. Причина этого, прежде всего связана с изменением конфигурации нивелирных ходов, а также увеличением числа штативов в них.

Чтобы оценить влияние веса загрузки в таблице приведены скорости накопления относительной разности осадки пары марок, расположенных на расстоянии 15,8 м друг от друга.

Таблица  
 Анализ стабильности изменений во времени параметров деформаций, определенных геодезическими методами

Номер цикла	Дата цикла	Загрузка в %	Превышение, мм		Относительная разность осадков, мм/м		Скорость, мм/м в год (детерминация $R^2$ )	
			измеренное	уравненное	измеренная	уравненная	измеренная	уравненная
1	09.2021	0,8%	0,0	0,0	0,0	0,0	$V_\Delta = 0,57$ ( $R^2 = 0,9643$ )	$V_\Delta = 0,57$ ( $R^2 = 0,96430$ )
2	10.2021	0,8%	-0,5	-0,5	0,0	0,0		
3	11.2021	0,8%	-1,5	-1,5	-0,1	-0,1		
среднее по этапу 1			0,7	0,7	$\Delta_{cp} = 0,04$	$\Delta_{cp} = 0,04$		
4	12.2021	14,0%	-15,5	-13,0	-1,0	-0,8	$V_\Delta = 1,74$ ( $R^2 = 0,9671$ )	$V_\Delta = -1,36$ ( $R^2 = 0,3333$ )
5	01.2022	15,0%	-18,5	-22,0	-1,2	-1,4		
6	02.2022	15,0%	-19,0	-17,0	-1,2	-1,1		
7	03.2022	15,5%	-22,5	-26,0	-1,4	-1,6		
8	04.2022	17,0%	-25,0	-20,0	-1,6	-1,3		
среднее по этапу 2			-20,1	-19,6	$\Delta_{cp} = 1,27$	$\Delta_{cp} = 1,23$		
9	05.2022	26,0%	-39,5	-37,0	-2,5	-2,3	$V_\Delta = 2,89$ ( $R^2 = 0,9677$ )	$V_\Delta = 2,05$ ( $R^2 = 0,5299$ )
10	06.2022	28,0%	-42,0	-47,0	-2,7	-3,0		
11	07.2022	28,0%	-46,5	-41,0	-2,9	-2,6		
12	08.2022	30,0%	-50,7	-48,0	-3,2	-3,0		
среднее по этапу 3			-44,7	-43,3	$\Delta_{cp} = 2,83$	$\Delta_{cp} = 2,74$		

Примечание:  $R^2$  – коэффициент детерминации, полученной при линейной аппроксимации;  $V_\Delta$  – скорость накопления относительной разности осадки, определенная путем линейной аппроксимации по периодам загрузки;  $\Delta_{cp}$  – среднее значение относительной разности осадки по периодам загрузки.

В таблице следует обратить внимание на коэффициенты детерминации  $R^2$ , полученные при определении скорости накопления относительной разности

осадки по периодам загрузки. Полученные коэффициенты существенно отличаются друг от друга. Например, на этапе 2 (с декабря 2021 по апрель 2022 гг.) скорость накопления относительной разности осадки, определенная по измеренным превышениям, составляет 1,74 мм/м в год с  $R^2 = 0,9671$ . Однако скорость, полученная из отношения разности высот к расстоянию, составляет 1,36 мм/м в год с  $R^2 = 0,3333$ . Приведенные различия связаны с тем, что изменилось само значение превышений за счет ввода поправок при уравнивании. Сами значения и соотношения полученных скоростей и коэффициентов детерминации может свидетельствовать о том, что процедура уравнивания может ухудшать искомые оценки параметров деформаций.

Приведенный пример носит, скорее, научно-исследовательский характер. К сожалению, в практике подобный анализ не принято делать.

На практике иерархия построения сетей может не учитываться как в полевых измерениях, так и при уравнительных вычислениях; само уравнивание может выполняться без учета стадийности [8] с использованием широко распространенных программных средств, таких как CREDO-DIALOG и др., требующих доработки для использования в геодезическом мониторинге; полученные при этом первичные данные требуют предварительного анализа на их состоятельность, а ранее приведенный график мог бы иметь следующий вид (рис. 2).

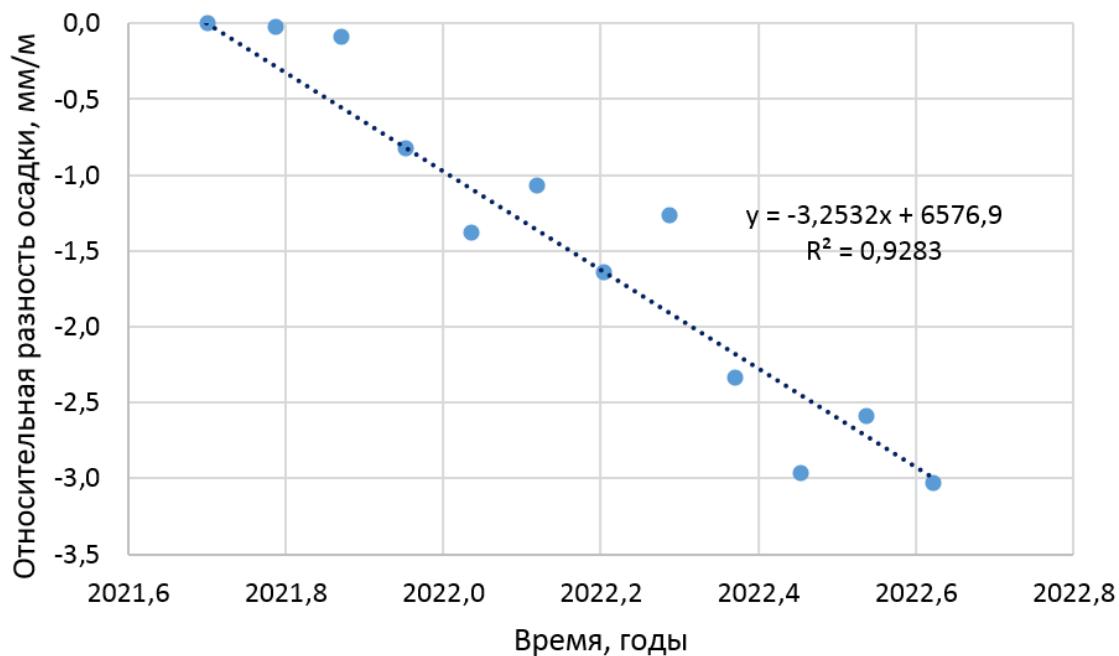


Рис. 2. График накопления относительной разности осадки по маркам 2 и 3

Следует обратить внимание на величину скорости накопления относительной разности осадки 3,2532 мм/м в год. Для анализа вряд ли возможно пользоваться такой величиной.

Принимая все это во внимание, был рассмотрен вопрос о том, какие параметры деформаций могут быть оценены с использованием превышений (измеренных и/или уравненных) при помощи эквивалентных формул.

Как оказалось, единственным параметром деформаций фундаментов, требующим использованием высот опорной и деформационной сети, является средняя осадка. Все остальные параметры, включая относительную разность осадки, относительный крен, максимальную осадку (подъем) могут быть определены, пользуясь измеренными и/или уравненными превышениями.

Для примера рассмотрен особенности определения относительного крена.

Относительный крен может быть определен пользуясь вертикальными смещениями координированных (с точностью до 10 см) деформационных марок ( $\Delta H_i$ ) из уравнения плоскости вертикальных смещений  $\Delta H_i = \Delta H_0 + k_x X_i + k_y Y_i$  [8]. Однако для оценки крена фундамента, вертикальные смещения могут быть определены и в условной системе высот, используя превышения, которые были приняты при этом за исходную высоту (например, равную 0 или иное число) или высоту одной и той же марки, сохранившейся во всех циклах измерений.

Здесь возникает вопрос о необходимости уравнивания. В пределах одноименного фундамента уравнивание необходимо как средство для оценки точности и качества определения превышений и методически соответствует требованиям к проведению стадийного уравнивания [8].

При выполнении такого уравнивания для отдельного наблюдаемого объекта коррелатным [7] или аналитическим способом Попова [4], получают независимые от опорной сети превышения, присваивают одной из (присутствующей во всех циклах измерений) деформационных марок статус исходной, вычисляют условные высоты, вертикальные смещения.

Расчет максимальной осадки (подъема) в пределах фундамента наблюденного объекта выполняют методом сравнения. Расчет относительной разности осадки при условии координированности деформационных марок не вызывает никаких затруднений.

Представлен расчет погрешности определения средней осадки. Для этого было выбрано три исходных условия.

Первое – является ли осадка равномерной или вместе с равномерной осадкой фундамент испытывает крен, второе – насколько симметрично месторасположение деформационных марок на фундаментной плите и может ли геометрия месторазмещения деформационных марок позволить выполнить достоверный расчет и третье – какова устойчивость опорной сети относительно которой определяется эта осадка.

Первое и второе условие определяются при оценке относительного крена фундамента.

Третье условие может быть получено из анализа протекания средних осадок соседних сооружений. Если средние осадки соседних сооружений с различной массой, конфигурацией и конструкцией, различными сроками

постройки и геодезических наблюдений, привязанные к одному и тому же исходному знаку коррелированы во времени, то исходная опорная сеть подлежит оценке геодинамической активности территории, охваченной этой сетью, а сам знак – оценке стабильности в пределах геодинамически однородной зоны.

Тогда погрешность определения средней осадки фундамента будет связана с погрешностями нивелирования в циклах измерений и погрешностью, связанной со стабильностью положения исходного репера.

Следует учесть, что определение средней осадки должно выполняться с учетом линейных размеров фундамента и осевой симметрии места размещения деформационных марок на фундаментной плите относительно аналитического геометрического центра фундамента.

Рассмотрены граничные условия к погрешностям средней осадки в виде ориентировочной скорости вертикальных смещений, принимая во внимание:

- максимальные требования к предельной средней осадке (по СП 22.13330.2016 [5]) с минимальным предельным значением 100 мм;
- максимальный срок службы 50 лет [6] и минимальную активную фазой строительной осадки (для песка 2–3 года, для глин – до 10 лет и более [1]);
- критерий стабилизации осадки – скорость вертикальных смещений менее 1 мм/год [2];
- экспоненциальный характер протекания строительной и постстроительной осадки [5].

Предлагается считать скорость вертикальных смещений после окончания стабилизационного периода не более 1,0 мм/год. Пусть функциональная зависимость после наступления скорости стабилизации в 1 мм/год будет определена условно линейной (консервативно – на самом деле подчиняясь экспоненциальной функции) с приращением скорости (минус 0,021 мм/год – для песков и минус 0,0025 мм/год для глин) до конца срока эксплуатации.

Тогда ожидаемая погрешность в итоге может дать ошибку во времени стабилизации от 1 до 5 лет и ошибкой до 10–15% от величины предельной осадки.

Из приведенного анализа применяемых методов оценки параметров деформаций геодезическими методами было сделано несколько выводов.

1. Применение эквивалентных формул позволяет увеличить достоверность оценок параметров деформаций, а также контролировать стабильность их изменения во времени, существенно улучшая оценки скорости их изменений. Особым условием использования эквивалентных формул является использование для каждого наблюдаемого объекта контролируемых замкнутых нивелирных полигонов, что рекомендуется нормативными техническими документами [7, 8].

2. Для крупных объектов с большим количеством сооружений (машины залы энергетических предприятий, протяженные линейные объекты с большим количеством привязочных ходов, объекты со сложными условиями для геодезических измерений и т.д.), для каждого сооружения:

– в программах геодезического мониторинга для высокоточного нивелирования (по ГОСТ 24846-2019 [2]) должны быть предусмотрены замкнутые полигоны для каждого наблюдаемого объекта, их стадийное строгое уравнивание превышений опорной сети, сети деформационных марок каждого наблюдаемого объекта и привязочных ходов;

– измеренные величины могут отличаться большей временной стабильностью чем величины, полученные после уравнивания.

3. Использование эквивалентных соотношений перспективно при проведении геодезического мониторинга, т.к. измеренные превышения могут быть получены не только методами высокоточного нивелирования, включая высокоточную инклинометрию, высокоточное гидростатическое нивелирование, а также прямые и наклономерные измерения.

4. Эквивалентные соотношения эффективны в ходе геодезического мониторинга при исследовании современных движений земной поверхности на геодинамических полигонах. Тем более, что основным контролируемым параметром является градиент скоростей вертикальных движений земной поверхности, эквивалентно определяемый как скорость изменения превышения между реперами или разность скоростей вертикальных смещений реперов в единицу расстояния между ними [3].

## Список литературы

1. Геодезические методы измерения вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В.Н. Ганьшин, А.Ф. Стороженко, Н.А. Буденков, А.Г. Ильин, В.И. Цюнько. М.: Недра, 1991. 189 с.
2. ГОСТ 24846-2019 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений.
3. Григоренко А.Г., Кюнцель В.В., Новак В.Е., Тамутис З.П. Инженерная геодинамика. Киев: Лыбидь, 1992. 296 с.
4. Попов В.В. Уравновешивание сети полигонов. М.: Геодезиздат, 1964. 148 с.
5. СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83».
6. СП 255.1325800.2016 Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения.
7. Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам / Под ред. В.Д. Большакова, Г.П. Левчука. М.: Недра, 1980. 781 с.
8. Стандарт СРО «СОЮЗАТОМГЕО» – СТО СРО-Г 60542954 00007-2023 Геодезический мониторинг деформаций зданий и сооружений атомных станций. Обработка данных и анализ.

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

**V.V. Veselov**

Atomenergoproekt JSC, Moskow, Veselov\_VV@aep.ru

## **ON ERRORS IN ESTIMATING THE PARAMETERS OF DEFORMATIONS OF BUILDINGS BY GEODETIC METHODS**

**Abstract.** The issues of geodetic monitoring of industrial and civil buildings are considered. It is shown that, under construction conditions, complex production conditions, as well as with large volumes of observations, the methods for calculating the parameters of deformations based on geodetic measurements can be significantly simplified without loss of reliability and even refined due to the use of equivalent formulas.

**Key words:** deformations; leveling; geodetic networks; stability; reference sign; excess.

**Кочнева Д.А., Гаврилюк Ф.Д., Скрыпицына Т.Н.**

МИИГАиК, геодезический факультет, кафедра фотограмметрии, г. Москва, mola\_mola@rambler.ru

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНО РАЗРУШЕННЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО МАТЕРИАЛАМ НАЗЕМНОЙ И АЭРОСЪЕМКИ, И ЛЮБИТЕЛЬСКИХ СНИМКОВ**

**Аннотация.** На территории России существует большое количество уникальных архитектурных памятников, которые расположены в небольших городах или в заброшенных селах. Сохранение и документирование текущего облика заброшенных архитектурных шедевров является залогом их успешного восстановления будущими реставраторами. В публикации представлены результаты работы, посвященной документированию заброшенных памятников архитектуры средствами архитектурной фотограмметрии, сочетающей использование современных наземных и аэроснимков, а также любительских архивных снимков. Объектом исследования стал архитектурный объект XVIII в. «Строгановский соляной амбар». Для получения современной модели фасадов и внутренних помещений использовалась комбинация наземной и аэросъемки с беспилотного воздушного судна. Для реконструкции утраченных элементов использовались любительские снимки. Точность полученной модели позволяет создавать чертежи масштаба 1:100.

**Ключевые слова:** фотограмметрия; архитектура; модель; моделирование; аэрофотосъемка; реконструкция; беспилотное воздушное судно (БВС).

### *Введение*

Моделирование частично разрушенных памятников архитектуры применяется для консервации облика здания на конкретный период и планирования дальнейших реставрационных работ [8].

Построение моделей возможно с помощью различных методов, основными из которых являются фотограмметрический и метод лазерного сканирования. Первый при должном исполнении обеспечивает достаточную для целей архитектурной реконструкции точность [4] и высокую доступность [2, 5, 7, 8].

Не все памятники архитектуры сохранили свой облик, большинство из них частично разрушены или перестроены. В таких случаях для восстановления утраченных элементов могут пригодиться любительские снимки, которые размещаются в свободном доступе в сети Интернет. Современные методы фотограмметрической обработки позволяют встраивать в современную модель изображения из неупорядоченного набора перекрывающихся снимков [1].

Объектом для изучения стал памятник архитектуры конца XVII – начала XVIII вв. «Строгановский соляной амбар», расположенный в г. Тутаев Ярославской области. Начиная с 2015 г. здание обрело собственника и началась подготовка к реставрационным работам, в связи с чем возникла необходимость сохранения и документирования его текущего облика [6].

## Методы и материалы

Соляной амбар представляет четырехугольную одноэтажную постройку, внутри которой находятся семь помещений (рис. 1), из которых только у двух сохранились каменные своды под крышей, три помещения без каменных сводов, но под крышей и два помещения без каменных сводов и крыши [6]. Особенность реставраторов интересовали модели помещений без сводов и крыши, как наиболее уязвимые для погодных явлений. Для этого использовались фотокамеры Canon PowerShot SX510 HS и с беспилотное воздушное судно (БВС) DJI Phantom 4 Pro V2.0.

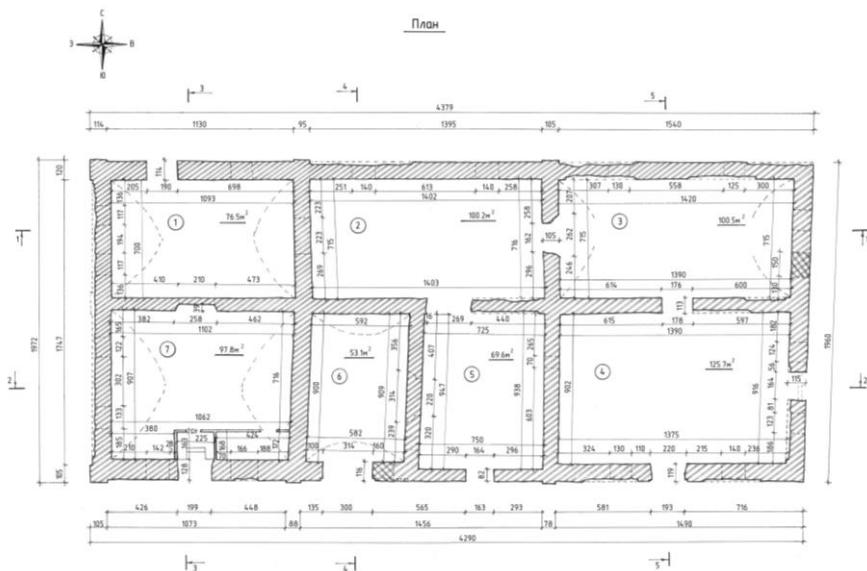


Рис. 1. План помещения, выполненный в 2016 г. архитектором А.С. Рыбниковым  
классическим способом архитектурных обмеров

Для обеспечения высокоточной координатной привязки всех помещений и внешнего контура здания было сделано геодезическое обоснование. Оно выполнялось как для аэросъемки с расположением опорных точек на земной поверхности, так и для обеспечения привязки наземных фотоснимков вертикальных поверхностей стен. Опорные точки на земле измерялись методом статических спутниковых измерений с помощью глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) приемником Topcon Hiper. Опорные точки на стенах представляли собой хорошо различимые части поверхности – контрастные пятна, сколы кирпичей, крупные шляпки кованых гвоздей – и измерялись с помощью тахеометра Trimble Zeiss 3305 DR методом полярной засечки. Для контроля часть опорных точек на фасадах измерялась дважды с разных точек наблюдения.

В результате геодезических работ был получен каталог координат опорных точек в системе координат WGS-84 UTM zone 37N. Выбор системы координат обусловлен возможностью перехода к ней от системы WGS-84, которая

используется при измерении координат ГНСС приемниками DJI Phantom 4 Pro V2.0 и Topcon Hiper [3]. Точность или среднеквадратическая ошибка (СКО) координат не превышала 0,005 м.

Наземная фотосъемка производилась с заранее рассчитанными параметрами съемки, двумя маршрутами, продольное перекрытие снимков составило 60% для фасадов и 70% для внутренних помещений. Дополнительно во внутренних помещениях прокладывались маршруты для съемки углов для связи соседних стен.

Для более качественного отображения высотных частей здания, и связи отдельных комнат, была применена съемка с БВС [5]. Съемка с БВС пожарной стенки позволила надежно связать помещения № 3 и 4 между собой. Съемка производилась по нормали к фасадам и под углом 45°.

В результате было получено более 900 снимков трех внешних стен и двух внутренних помещений. После отбраковки в работу были приняты 758 изображений (рис. 2).

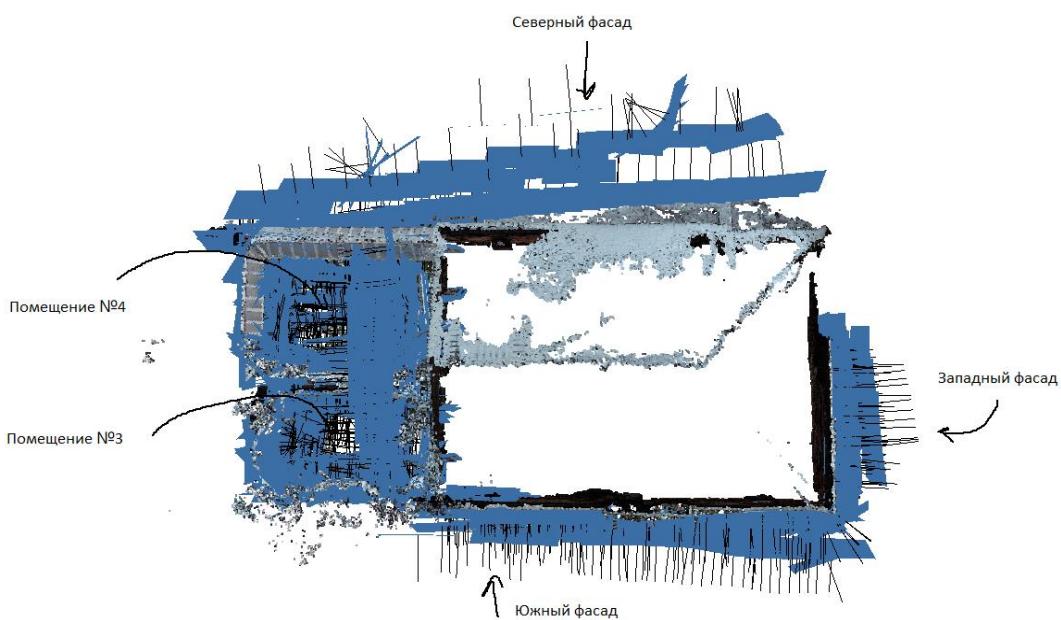


Рис. 2. Схема расположения снимков, представлена с помощью программного обеспечения Agisoft Metashape

Также от собственника здания были получены любительские снимки, сделанные в 2016 г. архитектором-реставратором А.С. Рыбниковым, который выполнял проект первоочередных противоаварийных работ и архитектурные обмеры памятника. На них запечатлены некоторые архитектурные элементы здания, утраченные на момент съемки 2022 г. Изображение были сделаны в разные времена года, на различные фотокамеры и под различными углами.

Полученные на этапе полевых работ материалы обрабатывались в программном обеспечении Agisoft Metashape [9]. Процесс обработки проходил по каждому фасаду и внутреннему помещению отдельно, в разных блоках одного проекта; в каждый блок загружались соответствующие снимки и файлы опорного геодезического обоснования. Далее была выполнена процедура фототриангуляции с самокалибровкой, в результате работы которой были уточнены элементы внутреннего ориентирования, вычислены элементы внешнего ориентирования, определяющие положение камер, и построены разреженные облака точек по блокам (табл.).

Таблица  
Точность триангуляции по опорным точкам

Объект измерений	Количество опорных точек	СКО, м
Северный фасад	6	0,006
Южный фасад	6	0,005
Западный фасад	4	0,004
Помещение №3	7	0,006
Помещение №4	6	0,004

Согласно требованию ГОСТ Р 56905-2016 [4], полученная точность позволяет создать чертежи 1:100 масштаба.

Затем были построены плотные облака точек раздельно для каждого помещения.

#### *Редактирование облака точек*

Для дальнейшей работы было необходимо отфильтровать точки, не являвшиеся основными частями здания. Вручную были удалены точки, найденные программным алгоритмом на снегу, деревянных поддерживающих конструкциях и строительном мусоре и мешающие дальнейшему анализу кирпичной кладки.

Съемки проводились в два этапа: в начале ноября с земли и в середине декабря с воздуха. Это стало причиной появления на декабрях снимках дополнительных несовершенств модели в виде снега на кирпичах стен. Для того чтобы удалить снег с модели, применялась методика наложения масок на области со снегом. Этот процесс удалось осуществить благодаря наличию изображений без снега. Далее производилось объединение облаков в единую модель здания.

#### *Интеграция архивных любительских снимков в модель*

В авторском распоряжении имелись изображения состояния здания и его частей на 2016 г. Было необходимо подобрать такие перекрывающиеся

фотографии, чтобы на них отображались утраченные фрагменты зданий. Отобрано 10 фотографий еще не заколоченного окна северной стены и 16 фотографий прохода между помещениями. Из них 20 снимков были выполнены в летний сезон и шесть – в зимний.

По найденным снимкам также были построены плотные облака точек на фрагменты утраченных фасадов, которые затем были интегрированы в модель здания по общим точкам (рис. 3). Редактирование архивных облаков проходило по аналогии с редактированием облака точек по современной съемке.



Рис. 3. Схема размещения связующих точек на разновременных снимках

Для интеграции в основную модель архивного облака была произведена предварительная подготовка, которая включала удаление разрушенных фрагментов из актуального облака точек. На снимках были выделены маской части, в которые предполагалось разместить архивные части, после чего облако было перестроено. Затем следовал процесс объединения облаков по опорным и связующим точкам. В результате получилось актуальное плотное облако со встроенными ретро моделями.

#### *Создание векторной трехмерной модели в программе Autodesk Revit*

Полученное плотное облако точек было экспортировано в формат \*.e57 и с помощью программы Autodesk ReCap [10] конвертировано в формат \*.rps, который соответствует требованиям программного обеспечения Autodesk Revit [2, 11].

В программном обеспечении Autodesk Revit была создана граница 3D вида, которая позволила не только распределить все уровни равномерно, но и при создании чертежа, скрывать мешающие элементы здания. Далее устанавливались параметры уровней, которые позволили корректно построить конструкцию без ошибок в высоте.

Следующим шагом происходил процесс отрисовки стен конструкции, толщина которых определялась по плотному облаку. Далее были вычерчены элементы крыши здания. Так как крыша имела разный наклон по обеим скатам, были установлены направления для каждого среза.

Заключительным этапом являлось создание чертежа остатков сводов в помещении № 3. Это было сделано следующим образом: была нарисована геометрически правильная форма свода, которая затем была приведена в соответствие с формой разрушенного фрагмента, что позволило удалить фактически отсутствующие детали. В результате была получена векторная трехмерная модель, представленная на рис. 4.

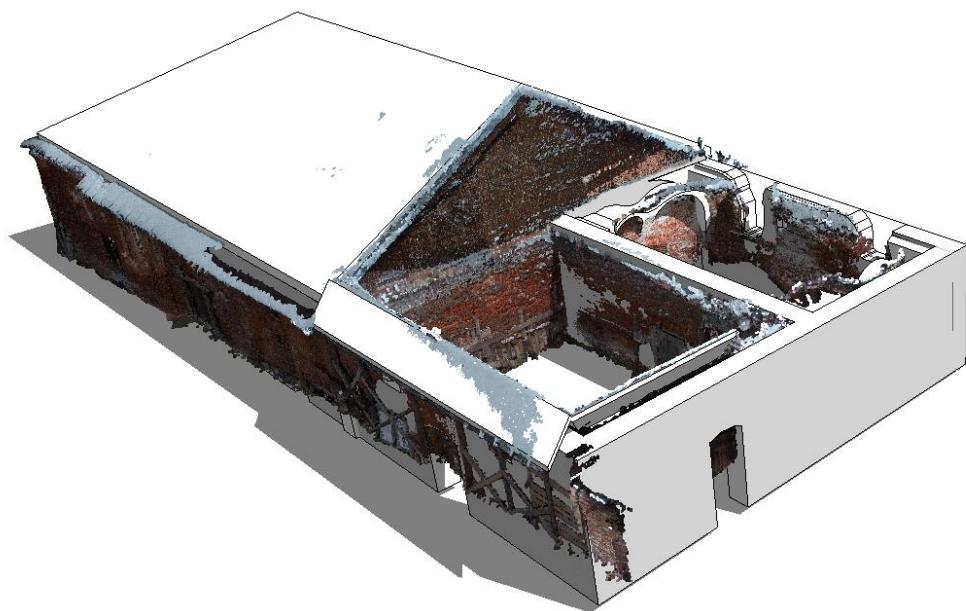


Рис. 4. Векторная 3D модель

### *Заключение*

Представленная в работе технология совместного использования современных и архивных снимков позволила реконструировать части фасада здания, которые на данный момент недоступны для исследования (заколочены, в аварийном состоянии). Для получения современной модели использовалась как наземная, так и воздушная фотосъемка.

Точность полученной модели позволяет создавать чертежи масштаба 1:100.

Предложенная технология представляет практическую ценность для проектирования реконструкционных работ.

Дальнейшая работа с объектом связана с созданием моделей помещений, находящихся под крышей, дополнение моделей внешних стен частей северного и восточного фасада после их расчистки.

### Список литературы

1. Блохинов Ю.Б., Веркеенко М.С., Скрябин С.В., Андриенко Е.Э. Автоматическое ориентирование неупорядоченного набора перекрывающихся снимков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 5. С. 91–98.
2. Веприцкая Е.Д. Применение фотограмметрии для фиксации и моделирования памятников архитектурной археологии (на примере башни Святого Константина в г. Феодосия) // Архитектура. 2017. Вып. 10. С. 136–141.
3. Господинов С.Г. Геодезическое обеспечение цифрового моделирования // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 5(17). С. 62–71.
4. ГОСТ Р 56905-2016. Проведение обмерных и инженерно-геодезических работ на объектах культурного наследия. Общие требования.
5. Скрыпицына Т.Н., Староверов С.В. Съемка фасадов зданий с использованием беспилотных воздушных судов // Инженерные изыскания. 2018. № 7–8. С. 46–52. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-7-8-46-52>.
6. Стародубов Ю.В. Соляной амбар Строгановых в Романове-Борисоглебске. Опыт изучения, сохранения и музеефикации // Сборник работ VI Всероссийской научной конференции, посвященной 70-летнему юбилею архитектора, автора проектов реставрации храмов Тотьмы Игоря Борисовича Медведева «Русский Север-2022: проблемы изучения и сохранения историко-культурного наследия». Тотьма: Изд-во Вологодского государственного университета, 2022. С. 68–76.
7. Barrile V., Fotia A., Candela G., Bernardo E. Integration of 3D model from UAV survey in BIM environment // The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-2/W11. P. 195–199. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-195-2019>.
8. Karachaliou E., Georgiou E., Psaltis D., Stylianidis E. UAV for mapping historic buildings: from 3D modelling to BIM // The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-2/W9. P. 397–402. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-397-2019>.
9. Официальный сайт Agisoft. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.agisoft.com/ru/downloads/user-manuals/> (дата обращения: 20.11.2023).

10. Официальный сайт Autodesk. Программное обеспечение Autodesk ReCap. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.autodesk.com/products/recap/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=RECAP> (дата обращения: 20.22.2023).
11. Официальный сайт Autodesk. Программное обеспечение Autodesk Revit. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=RVT> (дата обращения: 20.22.2023).

**D.A. Kochneva, F.D. Gavrilyuk, T.N. Skrypitsyna**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, mola\_mola@rambler.ru

## **MODELLING OF PARTIALLY DESTROYED ARCHITECTURAL OBJECTS BASED ON THE MATERIALS OF GROUND AND AERIAL PHOTOGRAPHY AND AMATEUR IMAGES**

**Abstract.** There is a large number of unique architectural monuments on the territory of Russia, which are located in small towns or in abandoned villages. Preserving and documenting the current appearance of abandoned architectural masterpieces is the key to their successful restoration by future restorers. The paper presents the results of the work devoted to documenting abandoned architectural monuments by means of architectural photogrammetry, combining the use of modern ground and aerial photographs with amateur archival images. The object of the study was the architectural object of the XVIII century “Stroganov salt barn”. A combination of ground and aerial photography from an unmanned aircraft used to obtain a modern model of facades and interiors. Amateur photographs were used to reconstruct the lost elements. The accuracy of the resulting model allows you to create drawings at a scale of 1:100.

**Key words:** photogrammetry; architecture; model; modelling; aerial photography; reconstruction; unmanned aerial vehicle (UAV).

**Курков В.М., Киселева А.С.**

МИИГАиК, геодезический факультет, г. Москва, [vkurkov@inbox.ru](mailto:vkurkov@inbox.ru), [ennnot@yandex.ru](mailto:ennnot@yandex.ru)

## **ПОДГОТОВКА И ПЕРЕПОДГОТОВКА КАДРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «БЕСПИЛОТНАЯ АЭРОФОТОСЪЕМКА, ВОЗДУШНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ И ФОТОГРАММЕТРИЯ» В МИИГАиК**

**Аннотация.** В публикации приведены сведения о внедрении с 2011 г. в учений процесс кафедры фотограмметрии современных технологий беспилотной аэрофотосъемки, воздушного лазерного сканирования и фотограмметрической обработки. Рассмотрен аспект взаимодействия с компаниями-партнерами, разработчиками и дилерами беспилотных воздушных судов. Показаны основные достижения в виде научно-исследовательских работ, публикаций, выступлений на научно-практических конференциях, диссертаций, дипломных работ, участия в экспедициях и т.д., что показывает актуальность и перспективность данного направления, как в учебной работе, так и исследовательской работе. Приведены сведения по повышению квалификации работников топографо-геодезической отрасли с 2020 г.

**Ключевые слова:** беспилотная аэрофотосъемка; воздушное лазерное сканирование; повышение квалификации; фотограмметрия; подготовка кадров.

В настоящее время подтверждено широкое внедрение беспилотной аэрофотосъемки (АФС) в различные сферы деятельности. Практически преодолено недоверие 10–15-летней давности о том, что беспилотные летательные аппараты являются уделом не наигравшихся в авиамодельных кружках «дядей» или не нашедших себя в большой авиации. Современные разработчики беспилотных воздушных судов (БВС) – это профессионалы с творческим мышлением и солидным авиационно-техническим образованием, способные решать различные научно-технические задачи. Благодаря их усилиям, за последние 10 лет БВС из простых летательных аппаратов превратились в сложные аэросъемочные системы, нашедшие широкое применение в топографо-геодезической отрасли. Современные БВС – это летающие роботы, способные в полностью автоматическом режиме выполнять АФС. Что же должен делать оператор БВС или как еще называют внешний пилот? Оказывается, совсем немало, а именно: изучить законы и правила использования воздушного пространства, правильно спланировать полетное задание, выбрать подходящие погодные условия, настроить аэрофотосъемочную камеру, принять решение в нештатной ситуации и получить материалы, пригодные для дальнейшей фотограмметрической обработки. При этом нельзя забывать, что для фотограмметрической обработки данных АФС необходимо определить координаты опознавателей и/или центров проекции аэрофотоснимков, что является геодезической задачей. Фотограмметрическая обработка материалов АФС позволяет получить подробную информацию о местности (ортотопланы, цифровые модели рельефа и местности, трехмерные модели земной поверхности и объектов, координаты объектов недвижимости и др.). Разработчики цифровых фотограмметрических систем (ЦФС) за последние годы

проделали большую работу по автоматизации процессов фотограмметрической обработки. Таким образом, фотограмметристу необходимо правильно применять нормативные технические документы, знать теоретические основы фотограмметрии и автоматизации измерений и уметь в интерактивном режиме исправлять ошибки. В занятиях в аудиториях и на практических примерах на геополигонах МИИГАиК подготавливают: операторов БВС, выполняющих аэрофотосъемку, геодезистов для привязки аэрофотоснимков или фотограмметристов для создания продукции о местности по материалам АФС. Студенты университета получают знания и навыки по широкому спектру дисциплин, имеющих отношение к работе в топографо-геодезической отрасли. В настоящее время подготовка бакалавров по профилю «Аэрокосмические съемки и фотограмметрия» направления «Геодезия и дистанционное зондирование» состоит из изучения базовых дисциплин: геодезия, теория математической обработки геодезических измерений, картография, техника и технология аэрокосмических съемок, космическая геодезия и основы спутниковых технологий позиционирования, фотограмметрия, ГИС-технологии и специальных курсов и разделов: геодезическое обеспечение аэрокосмических съемок, особенности обработки беспилотной АФС, нормативно-правовая база для использования воздушного пространства РФ. Теоретические знания и практические навыки, полученные в результате изучения перечисленных дисциплин, закрепляются летней производственной практикой на Заокском геополигоне МИИГАиК, где студенты в течение восьми недель выполняют комплекс работ: обследование и восстановление пунктов (опознаков) геодезического обоснования, аэрофотосъемку с использованием БВС, фотограмметрическую обработку материалов АФС, полевое обследование результатов фототопографической съемки и определение участков, где необходима дополнительная съемка наземными геодезическими методами [9, 10]. Данная практика проводилась с 2011 по 2015 гг., пока готовили инженеров по специальности «аэрофотогеодезия». Она имела статус учебной практики и проходила по согласованию с заведующими кафедр аэрокосмической съемки, фотограмметрии, а также космического мониторинга и дешифрирования как совместная комплексная практика. По мнению авторов, это был хороший пример взаимодействия подразделений университета. С переходом на двухуровневую систему подготовки кадров (бакалавры, магистры), практика проводится в статусе производственной и носит добровольный характер, т.е. студент имеет право выбора – пройти практику на производстве или на геополигоне. Из опыта прошедших практик ее лучше назвать учебно-производственной, поскольку надо признать, что при подготовке бакалавров существенно сократилось время, выделяемое на практические занятия в полевых условиях. Студенты после III курса не готовы к самостоятельному выполнению производственных заданий, им необходимо привить дополнительные профессиональные навыки. От представителей различных компаний поступает информация, что подобную комплексную практику следует сделать обязательной, поскольку те

компетенции, которые студенты получают на данной практике, весьма востребованы в топографо-геодезическом производстве. Важным элементом производственной практики является ее начальная фаза, которая называется «обследование и восстановление пунктов геодезической сети и маркированных опознавателей». В настоящее время на территории площадью 30 км<sup>2</sup> восстановлено и поддерживается 32 пункта геодезической сети постоянного заложения (пункты триангуляции и полигонометрии), которые когда-то были установлены для проведения учебных практик по высшей геодезии, прикладной геодезии и геодезии. В 2012 г. координаты всех этих пунктов были определены с использованием ГНСС-оборудования и приведены в единую систему координат. На территории площадью 12 км<sup>2</sup> заложено 72 маркированных опознавателей с точностью взаимного положения 2–3 см, а на площади 200 км<sup>2</sup> имеется около 150 естественных опознавателей с точностью 5–10 см для привязки аэрофотоснимков и космических изображений. Ежегодно частично обследуются и перенаблюдаются существующие опознаватели, а также закладываются новые силами студентов, проходящих практику. От этого вида работ двойная польза – студенты получают навыки ГНСС-наблюдений и поддерживают в работоспособном состоянии инфраструктуру Заокского геополигона. Именно наличие геодезической сети и маркированных опознавателей, которые используются в качестве опорных и контрольных точек при фотограмметрической обработке материалов АФС, привлекает на практику компании, деятельность которых связана с аэрофотосъемкой. Наряду с обучением студентов в программу включаются исследовательские задачи по тестированию беспилотных аэрофотосъемочных комплексов [8, 13]. Таким образом, студенты не только получают навыки выполнения аэрофотосъемки с использованием БВС, но и непосредственно участвуют в научно-исследовательских работах, которые в дальнейшем переходят в дипломные и квалификационные работы, магистерские и кандидатские диссертации. С 2011 г. ежегодно 5–7 дипломных работ готовится по материалам, полученным на практике. Эти материалы беспилотной АФС также используются в учебном процессе на кафедре фотограмметрии. Благодарности заслуживают компании, активно участвующие в проведении летно-съемочных работ: «ПТЕРО», «Геоскан», «СТЦ», «Финко», «Люфтера», «Газпром Космические системы», «Йена Инструмент», «Небесная механика», «Аэрогеоматика». Без их участия и поддержки трудно представить проведение подобной технически сложной практики. Следует отметить, что во время аэрофотосъемочной части практики, кроме БВС, применяется и пилотируемая авиация. Так, в 2012 г. компания «Мосгипротранс» выполнила исследования аэрофотосъемочного комплекса DiMAC Ultra Liht+ и воздушного лазерного сканера Leica ALS-50, установленных на АН-2. С 2013 по 2018 гг. кафедра геодезии, геоинформатики и навигации Московского института инженеров транспорта выполнила несколько тестовых полетов с камерой Hasselblad H4D-60 aerial, установленной на мотодельтаплане «Азимут 2м». В 2014 г. компания «Сигма Метрикс» тестировала аэрофотосъемочные комплексы DMC II 250 и

Leica RCD30oblique Penta, а также лазерный сканер АНВ DragonEye, установленные на двухмоторном самолете TECNAM P2006T MMA. В 2016 г. конструкторское бюро «Луч» провело испытания гиперспектральной камеры собственной разработки. Все полученные материалы используются в исследовательских работах и в учебном процессе. С 2011 г. по настоящее время в период проведения практики выполнено более 100 контрольно-испытательных полетов беспилотными и пилотируемыми летательными аппаратами. Материалы исследований представлены в виде докладов на конференциях и публикаций в различных научных изданиях [3–5, 11, 17, 18, 20–23]. В период с 2012 по 2018 гг. студенты во время практики выполнили привязку изображений с космических аппаратов SPOT 5, WordView-2, Pleiades, АИСТ, предоставленных для учебного процесса компаниями «СКАНЭКС», «Иннотер», «Ракурс». Таким образом, в зоне внимания на практике не только материалы АФС с беспилотных и пилотируемых воздушных судов, но и данные дистанционного зондирования Земли из космоса. А приоритет беспилотной АФС вызван тем, что эта технология более доступна, и области ее применения постоянно расширяются.

В 2018 г. был приобретен квадрокоптер компании DJI Phantom 4 Pro в ходе участия кафедры фотограмметрии в гранте Российского фонда фундаментальных исследований по археологии совместно с Государственным историческим музеем и ГОСНИИАС. Участие в этой работе сотрудников кафедры было обусловлено накопленным ими опытом при проведении практики студентов. С 2018 по 2020 гг. сотрудники кафедры вместе со студентами приняли участие в четырех Боспорских археологических экспедициях на п-ове Тамань. Студенты, прошедшие практику по беспилотной АФС, показали хорошие профессиональные навыки и самостоятельно выполняли комплекс работ по аэрофотосъемке с помощью БВС, геодезической привязке и фотограмметрической обработке материалов. Результаты совместной работы сотрудников кафедры со студентами представлены на ряде конференций, в т.ч. зарубежных, опубликованы в российских и зарубежных журналах [1, 6, 7, 12, 14, 16, 19, 24].

Появление на кафедре квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro дало возможность проводить со студентами практику по аэрофотосъемке с БВС своими силами, а работа с представителями компаний – разработчиков БВС – стала весомым дополнением к освоению АФС с беспилотных летательных аппаратов. Во время геодезической части практики кроме поддержания геодезической сети и опознавания в актуальном состоянии была выполнена наземная тахеометрическая съемка населенных пунктов, определены координаты 150 точек объектов недвижимости, а также созданы цифровые модели рельефа двумя методами: по результатам тахеометрической съемки и съемки рельефа ГНСС-оборудованием в режиме реального времени. Сравнение полученных геодезическим способом пространственных данных о местности с аналогичными данными по результатам фотограмметрической обработки убедительно показывает их соответствие по точности нормативным требованиям. Студенты, проходящие практику, узнают о возможностях использования того или иного способа получения топографо-

геодезических материалов о местности и готовы сознательно принимать решение, какой из них более эффективен при решении конкретной задачи. Такой контроль результатов фотограмметрической обработки убедителен не только для студентов, но и для компаний, участвующих в проведении практики, а также тех, кто еще сомневается в возможностях использования беспилотной АФС для решения широкого круга задач в топографии, кадастровых работах, инженерных изысканиях, маркшейдерии и других областях. Искренняя благодарность организациям, которые помогали при выполнении геодезических работ, предоставляли оборудование и программное обеспечение, читали лекции и проводили занятия со студентами. Это такие компании, как «ГНСС плюс», «КредоДиалог», «Геометр-Центр», Московское представительство Trimble, «НАВГЕОКОМ», «Ориент Системс» и совместно с кафедрой геодезии МИИГАиК.

Для фотограмметрической обработки материалов АФС на практике студентов кафедра фотограмметрии штатно использует ЦФС PHOTOMOD UAS и программное обеспечение Agisoft Metashape, на которые компании-разработчики предоставили постоянные лицензии. Эти программные средства являются базовыми, поскольку они российского производства и широко применяются как в России, так и в других странах. Параллельно с ними студенты знакомятся с зарубежным программным обеспечением: PIX4D, Context Capture, DJI Terra, INPHO UAS Master и др. Для их использования кафедра фотограмметрии получает временные лицензии через посредничество компаний-партнеров или напрямую от разработчиков. Следует отметить, что довольно популярной темой дипломных работ у студентов является сравнение различных цифровых фотограмметрических систем для выполнения фотограмметрической обработки. Подводя итог 13-летней работы, можно сказать, что курс «Беспилотная аэрофотосъемка и фотограмметрия», включая практику на Заокском геополигоне, прошли 117 студентов. Многие выпускники успешно работают в тех компаниях, которые приезжают на геополигон для участия в аэрофотосъемочной части практики, подтверждая необходимость ее прохождения. Кроме подготовки студентов по направлению «Беспилотная аэрофотосъемка и фотограмметрия» в отрасли имеется необходимость в переподготовке кадров и в 2020 г. была разработана программа для курсов повышения квалификации по данному направлению. Основой программы стал опыт работы со студентами. Несмотря на сложности 2020 г., осенью удалось набрать группу из восьми человек и провести занятия. В апреле 2021 г. пройти повышение квалификации по данному направлению изъявили желание уже 17 человек.

Начиная с мая 2022 г., курсы повышения квалификации проводятся по программе «Беспилотная аэрофотосъемка, воздушное лазерное сканирование и фотограмметрия». Всего с 2020 г. курсы повышения квалификации прошли 54 слушателя из более чем 40 предприятий топографо-геодезической отрасли, кадастра недвижимости, проектно-изыскательских организаций и др. организаций России, с широкой географией от г. Владивостока и Чукотки до городов Калининграда и Минска. Следует отметить принципиальные отличия

работы со студентами и со специалистами предприятий: 1) базовые знания студентов более-менее известны, а у слушателей курсов они разные; 2) мотивация у слушателей выше, чем у студентов; 3) на работу со студентами отводится больше времени, чем со слушателями, что позволяет достичь устойчивых практических навыков во всех сферах подготовки (геодезия, АФС и фотограмметрия), тогда как со слушателями делается акцент на выполнение аэрофотосъемки и ее геодезическом обеспечении. Исходя из полученного опыта, кафедра фотограмметрии рассматривает отраслевой принцип набора групп по таким направлениям, как кадастр, маркшейдерия, инженерные изыскания, дорожное строительство и т.д. Кроме того, возможно проведение курсов по региональному принципу с выездом на место работы слушателей.

Дополнительно к курсу повышения квалификации по программе «Беспилотная аэрофотосъемка, воздушное лазерное сканирование и фотограмметрия» в учебный процесс студентов запланировано внедрение курса по воздушному лазерному сканированию (ВЛС) с БВС. Целесообразность введения данного направления в учебный процесс обусловлена потребностями современного топографо-геодезического производства, поскольку с каждым годом все больше предприятий и компаний внедряют ВЛС с БВС как новое средство геодезических измерений. В последнее время для обновления учебного процесса в МИИГАиК приобретено три комплекса Геоскан 401 Лидар с цифровой съемочной камерой и сканером МС3. Группа молодых преподавателей вуза прошла обучение по работе с комплексом и обработке данных в различных программах: КРЕДО 3Д СКАН, ReClouds на платформе nanoCAD, Terra Solid на платформе Microstation.

Первоначальные знания и навыки сотрудниками кафедры фотограмметрии были получены в период работы в Боспорской археологической экспедиции на п-ове Тамань. В апреле 2018 г. на объекте «Красный Октябрь 1», а в сентябре 2018 г. на объекте «Семибратьев городище» сотрудниками компании «АГМ Системы» (Краснодар) были проведены совместные работы с выполнением воздушного лазерного сканирования с БВС некоторых археологических памятников. При обработке данных ВЛС была получена весьма ценная для археологических исследований информация [16]. В июле 2020 г. и в апреле 2021 г. на Заокском геополигоне совместно с компаниями «Геоскан» и «АГМ Системы» выполнено пробное воздушное лазерное сканирование с БВС Геоскан 401. Результаты обработки данных ВЛС весьма обнадеживают и опубликованы [15].

В итоге появилась возможность подготовить «ГОСТ Р 5956-2021 Съемка аэрофотоподографическая. Технические требования» [2], где учтены результаты научно-исследовательской работы по направлению беспилотной АФС.

## Список литературы

1. Беспилотная аэрофотосъемка в учебном процессе и научно-исследовательской работе / А.Г. Чибуничев, В.М. Курков, А.А. Кобзев,

- П.Ю. Вагин, В.И. Койдан // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения». СПб.: Изд-во ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. С. 518–528.
2. ГОСТ Р 5956-2021 Съемка аэрофототопографическая. Технические требования.
  3. Кадничанский С.А., Курков М.В., Курков В.М., Чибуничев А.Г. Анализ точности фототриангуляции снимков камеры Phase One в ЦФС PHOTOMOD // Геопрофи. 2019. № 4. С. 39–43.
  4. Кадничанский С.А., Курков М.В., Курков В.М., Чибуничев А.Г. Фотограмметрическая калибровка фотокамеры для аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Геопрофи. 2019. № 6. С. 35–40.
  5. Кадничанский С.А., Курков М.В., Курков В.М., Чибуничев А.Г. О сертификационных испытаниях программно-аппаратного комплекса на основе беспилотного воздушного судна «Геоскан 401» // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 3. С. 32–38. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-957-3-32-38>.
  6. Кобзев А.А., Скрыпицьна Т.Н., Курков В.М. Технология комплексного обследования археологических памятников с применением наземного и воздушного дистанционного зондирования // Тезисы докладов IV Международной конференции «Археология и геоинформатика». М.: Изд-во ИА РАН, 2019. С. 47–48.
  7. Комплексное обследование археологических памятников с использованием воздушного и наземного зондирования / В.М. Курков, Т.Н. Скрыпицьна, Д.В. Журавлев, У.Шлотцаер, В.А. Князь, А.А. Кобзев, К. Мишке // Экология, экономика, информатика. Т. 3. Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2018. С. 151–157.
  8. Курков В.М. Опыт работы по тестированию аэрофотосъемочных комплексов на испытательном полигоне МИИГАиК // Сборник материалов 10-й Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения». М.: Проспект, 2014. 132 с.
  9. Курков В.М., Капустина А.В. Комплексная учебная практика по созданию крупномасштабных карт и других документов о местности // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2013. № 2. С. 62–62.
  10. Курков В.М., Смирнов А.В., Иноземцев Д.П. Опыт использования БЛА при проведении практики студентов на «Заокском геополигоне» МИИГАиК // Геопрофи. 2014. № 4. С. 55–61.
  11. Курков В.М., Смирнов А.В., Кузнецов В.А. Обзор факторов и условий, влияющих на применение беспилотных воздушных судов, предназначенных для решения задач картографирования // Геоинформатика. 2019. № 3. С. 19–26.

12. Курков В.М., Скрыпицына Т.Н., Созонова А.Ю. Методы и технологии аэрофотосъемки и наземной фотограмметрической съемки при археологических изысканиях // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2020. Вып. 5. С. 75–82. <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2020-2-5-75-82>.
13. Курков В.М., Чибуничев А.Г., Гречишев А.В. Тестирование аэрофотосъемочных комплексов на испытательном полигоне МИИГАиК при внедрении инновационных технологий в топографо-геодезическое производство // Сборник статей «Экология, экономика, информатика». Т. 3. Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов н/Д.: Изд-во Южного федерального университета, 2015. С. 71–81.
14. Новые данные о структуре Античных памятников Азиатского Боспора (по данным дистанционного зондирования) / Д.В. Журавлев, А.В. Батасова, У. Шлотцауэр, В.М. Курков, Т.Н. Скрыпицына, В.А. Князь, А.И. Кудряшова, А.А. Кобзев, К. Мишка // Материалы международной научной конференции «XX Боспорские чтения. Боспор Киммерийский и варварский мир в период античности и средневековья. Основные итоги и перспективы исследований». Симферополь – Керчь, 2019. С. 193–200.
15. Опыт применения комплекса «Геоскан 401 Лидар» в качестве беспилотной топографической системы воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки / В.А. Брусило, А.С. Киселева, Д.А. Клестов, М.В. Курков, В.М. Курков // Геопрофи. 2021. № 6. С. 17–23.
16. Скрыпицына Т.Н., Кобзев А.А., Курков В.М. Журавлев Д.В. Данные дистанционного зондирования как геопространственная основа для археологических исследований // Инженерные изыскания. 2019. Т. XIII. № 3. С. 18–26.
17. Смирнов А.В., Курков В.М., Воробьева Н.Г. Создание документов о местности в интересах инженерных изысканий по результатам аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов // Материалы XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. М.: ООО «Геомаркетинг», 2018. С. 659–670.
18. Фадеев Н.Б., Скрыпицына Т.Н., Курков В.М., Замятина Е.О. Создание ГИС в целях ресурсоведения лекарственных растений на основе дешифрирования аэрофотоснимков с БПЛА // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Использование современных информационных технологий в ботанических исследованиях». Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2017. С. 121–123.
19. Chibunichev A.G., Knyaz V.A., Zhuravlev D.V., Kurkov V.M. Photogrammetry for archaeology: collecting pieces together // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. Vol. XLII-2:235. P. 240. <https://doi.org/10.5194/isprs-archivesXLII-2-235-2018>.

20. Fadeev N.B., Skrypitsyna T.N., Kurkov V.M., Sidelnikov N.I. Use of remote sensing data and GIS technologies for monitoring stocks of medicinal plants: problems and prospects // Proceedings of the International Conference “Information Technologies in the Research of Biodiversity”. Cham, Switzerland: Springer, 2019. P. 14–21. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-11720-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11720-7_3).
21. Florinsky I.V., Kurkov V.M., Bliakharskii D.P. Geomorphometry from unmanned aerial surveys // Transactions in GIS. 2017. Vol. 22. No. 1. P. 58–81. <http://dx.doi.org/10.1111/tgis.12296>.
22. Kurkov V.M., Kiseleva A.S. Dem accuracy research based on unmanned aerial survey data // The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2020. Vol. XLIII-B3-2020. P. 1347–1352. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1347-2020>.
23. Results of researches on photogrammetric calibration of the Sony Cyber-Shot DSC-RX1RM2 Camera / S.A. Kadnichansky, M.V. Kurkov, V.M. Kurkov, A.G. Chibunichev, L.K. Trubina // The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-2/W18. P. 73–77. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLII-2-W18-73-2019>.
24. Study of the hidden ancient anthropogenic landscapes using digital models of microtopography / T. Skrypitsyna, V. Kurkov, D. Zhuravlev, V. Knyaz, A. Batasova // Proceedings of the “Image and Signal Processing for Remote Sensing” XXVI Conference. Online, 2020. Vol. XXVI. ID 115331F. <https://doi.org/10.1117/12.2572995/10.1117/12.2572995>.

**V.M. Kurkov, A.S. Kiseleva**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, [vkurkov@inbox.ru](mailto:vkurkov@inbox.ru), [ennnot@yandex.ru](mailto:ennnot@yandex.ru)

## **TRAINING AND RETRAINING OF PERSONNEL IN THE DIRECTION OF “UNMANNED AERIAL PHOTOGRAPHY, AIR LASER SCANNING AND PHOTOGRAHMETRY” AT THE MOSCOW STATE UNIVERSITY OF GEODESY AND CARTOGRAPHY**

**Abstract.** The article provides information about the introduction of new technologies of unmanned aerial survey, airborne laser scanning and photogrammetric processing into the scientific process of the Photogrammetry Department since 2011. The aspect of interaction with partner companies, developers and dealers of unmanned aerial vehicles is considered. The main achievements in the form of research works, articles, presentations at scientific-practical conferences, theses, dissertations, theses, participation in expeditions, etc. are shown, which shows the relevance and prospects of this direction, both in educational work and research work. The information on professional development of workers of topographic-geodesic industry from 2020 is given.

**Key words:** unmanned aerial survey; airborne laser scanning; professional development; photogrammetry; personnel training.

## СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

Стурман В.И.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
факультет радиотехнологий связи, кафедра экологической безопасности телекоммуникаций,  
г. Санкт-Петербург, st@izh.com

### ПРОБЛЕМА НЕГАТИВНОГО РЕЗУЛЬТАТА ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

**Аннотация.** Рассмотрены причины, обстоятельства и последствия негативных результатов инженерно-экологических изысканий. Представлены предложения по совершенствованию нормативной базы в целях минимизации последствий негативных результатов для заказчиков и по улучшению взаимодействия исполнителей разных видов изысканий для строительства.

**Ключевые слова:** инженерно-экологические изыскания; нормативная база изыскательских работ; негативный результат; взаимодействие изысканий.

#### *Введение*

Известное выражение Нильса Бора «Отрицательный результат – тоже результат» бытует в фундаментальной науке, но не в бизнесе, каковым по сути являются инженерные изыскания. От отрицательного результата следует отличать негативный, что близко по смыслу, но не тождественно. Негативный результат объединяет с отрицательным нежелательность для заказчика, но отличает возможность преодоления за счет дополнительных затрат. Получается, что отрицательный результат может рассматриваться как частный, наиболее жесткий случай результата негативного. Тем не менее, негативные и в т.ч. отрицательные результаты в инженерных изысканиях неизбежны, проблема лишь в сроках и цене их получения, а также в реакции на них заказчика и исполнителя.

#### *Источники и содержание проблем*

К негативным результатам в инженерно-экологических изысканиях могут приводить следующие обстоятельства.

1. Сведения, содержащиеся в ответах уполномоченных министерств и ведомств, государственных органов, профильных организаций (согласно приложению Б СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [3]). Отрицательный результат может быть связан с наличием на намечаемой территории размещения объекта особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и объектов культурного наследия, месторождений полезных ископаемых, видов растений,

грибов и животных, занесенных в Красные Книги, скотомогильников, биотермических ям и других мест захоронения трупов животных, защитных лесов и особо защитных участках леса, особо ценных сельскохозяйственных угодий, ключевых орнитологических территорий, лечебно-оздоровительных местностей, курортов и природно-лечебных ресурсов, мест зимовки, нереста, нагула и ската молоди рыб. Кроме того, негативный результат (необходимость переноса площадок и трасс, дополнительные затраты на подготовку территории и компенсационные мероприятия, уменьшение мощности объекта) может быть следствием выявления рыбохозяйственных заповедных и рыбоохраных зон, приаэродромных территорий, полигонов отходов, водоохраных зон и зон санитарной охраны, территорий угрожаемых по сибирской язве, мест миграции и размножения охраняемых и охотничьих видов животных, санитарно-защитных зон (СЗЗ) и санитарных разрывов, территорий традиционного природопользования, кладбищ, крематориев и их СЗЗ, лесов имеющих защитный статус, резервных лесов, особо защитных участков лесов, лесопарковых поясов и других ограничений природопользования.

Выявление таких ограничений на данной стадии позволяет заказчику избежать неоправданных затрат на полевые и лабораторные работы, но это возможно только при соблюдении последовательности работ. К сожалению, это является скорее исключением, чем правилом. Качество ответов уполномоченных государственных органов часто оставляет желать много лучшего. Вместо конкретных ответов на запросы приходят общие фразы о порядке установления ограничений, отсылки к другим государственным органам и их сайтам, списки... Не лучший пример подает Минприроды РФ, когда вместо конкретных ответов о наличии или отсутствии ООПТ федерального уровня на некоторой территории шлет списки ООПТ по всем регионам РФ. Т.е. государственные органы фактически перекладывают работу по проверке мест выполнения работ на самих изыскателей и экспертные органы. Перечень и адресаты запросов регламентируются в СП 502.1325800.2021 [3], но обязанность государственных органов по существу отвечать на запросы нигде не зафиксирована.

Негативным (но полезным для заказчика) результатом, выявляемым при помощи запросов в государственные органы, могла бы быть своевременно полученная информация о необеспеченности намечаемой деятельности природными ресурсами. Так, автор, в качестве председателя экспертной комиссии государственной экологической экспертизы, однажды «притормозил» проект коттеджного поселка, потребность которого в воде более чем вдвое превышала указанный в гидрогеологическом заключении допустимый объем отбора из подземных источников. Однако среди 52 позиций, запрашиваемых в организациях 16 типов согласно приложению Б СП 502.1325800.2021 [3], обеспеченность объектов необходимыми для их функционирования ресурсами не значится.

2. Выявление редких или исчезающих видов растений, грибов и животных при изысканиях – весьма реальная причина отрицательного результата в случае

наличия на территории работ ненарушенных природных ландшафтов. Для этого, однако, требуется достаточно высокий уровень квалификации и добросовестности исполнителей. Проблема может быть решена путем введения обязательного научного сопровождения при наличии на территории изысканий ненарушенных природных ландшафтов, что для инженерно-экологических изысканий может рассматриваться как выполнение работ в сложных природных условиях. Это же могло бы стать дополнительным стимулом сохранения ненарушенных природных ландшафтов.

3. Выявление при изысканиях высоких уровней химического, физического или биологического загрязнения – фактор не отрицательного, но негативного результата, означающего дополнительные затраты на подготовку территории. В некоторых случаях, в частности при жилой застройке бывших промышленных зон (г. Санкт-Петербург), мероприятие это довольно обычное. Экологические проблемы создает не столько снятие и вывоз загрязненных грунтов, сколько их утилизация. В экспертной практике автора было три случая, когда отрицательными заключениями закончились попытки провести через экспертизу проекты, в которых размещение отходов маскировалось иными целями – рекультивацией, инженерной подготовкой территории.

4. Обнаружение при проведении инженерных изысканий признаков подверженности территории опасным процессам, или неприемлемо близкого залегания подземных вод. Теоретически это задача инженерно-геологических изысканий. Однако в изыскательской практике автора бывали случаи выявления оползневых форм рельефа и отложений, оставшихся незамеченными при инженерно-геологических изысканиях. Характерно, что свод правил по инженерно-геологическим изысканиям СП 446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [2] регламентирует методы изучения оползневых процессов, но не методы их выявления. То же можно сказать о супфозии, в т.ч. техногенной.

Взаимодействие исполнителей инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий – застарелая проблема. Изучение загрязнения подземных вод закономерно входит в состав инженерно-экологических изысканий, но необходимые для этого технические средства находятся у исполнителей инженерно-геологических изысканий.

5. Теоретически негативным результатом инженерно-экологических изысканий могло бы (и должно рано или поздно стать) заблаговременное выявление неприятия намечаемой деятельности населением, если бы социально-экономический раздел отчета не сводился к формальному и бессмысленному изложению соответствующей статистики. К сожалению, среднестатистический инвестор пока пребывает в уверенности, что социально-экологические конфликты случаются от социологов и экологов (как болезни – от врачей), и реагирует на них запоздало.

## Последствия

Инженерно-геологические изыскания отличаются от инженерно-экологических в т.ч. и тем, что результат их представляет собой информацию об условиях выполнения работ, а не формальное разрешение на их выполнение. Какие бы осложнения геологического характера не выявились, заказчик бывает морально готов к тому, что это – элемент инвестиционного риска.

Возможность негативного и в т.ч. отрицательного результата – это специфика инженерно-экологических изысканий, никак пока не отраженная в нормативной базе. Поэтому, сталкиваясь с таким неприятно-неожиданным результатом, заказчик не всегда адекватно реагирует на него. К наиболее типичным проявлениям неадекватных реакций относятся давление на изыскателей в целях склонения их к искажениям и скрытию нежелательных результатов, а также попытки давления на экспертные комиссии, если давления на изыскателей оказалось недостаточно. В экспертной практике автора встречались такие примеры искажения результатов изысканий, как:

- «переименование» грунтовых вод в почвенные, незащищенные грунтовые вод (по В.М. Гольдбергу) в слабозащищенные;
- «пересмотр» табличных фильтрационных характеристик грунтов, допустимых содержаний тяжелых и токсичных металлов, минимально допустимых глубин залегания грунтовых вод и т.п.;
- «исключение» из геологического разреза территории отдельных нежелательных элементов (содержащих водоносные горизонты);
- «интерпретация» данных бурения, с представлением на разрезах нежелательных слоев в виде локальных, изолированных линз.

Качественно выполненная экспертиза не только фиксирует соответствие некоторым условным показателям, но и позволяет установить, в какой мере изыскатель выявил, а проектировщик использовал все особенности природных условий территории, влияющие на безопасность и стоимость проектируемого объекта [4]. Поэтому искажения результатов обычно выявляются путем сопоставления проектных и изыскательских материалов между собой, сравнения их с топоосновой и космическими снимками, опубликованными научными данными. В противном (увы, весьма распространенном) случае градостроительного освоения территории реализуется один и тот же сценарий, описанный Е.Ю. Колбовским [1]:

- инвесторы, стремясь к получению наибольшей прибыли, настаивают на максимально интенсивном использовании участка, что означает предельно плотную высокэтажную застройку и минимальное финансирование изыскательских и проектных работ;
- изыскатели обосновывают готовые решения по принципу «чего изволите»;
- проектировщики, ориентируясь на заданные максимальные параметры, разрабатывают плохо привязанные к месту стандартные проекты, повсеместно

рекомендуют шаблонные способы подготовки территории (выравнивание, подсыпка, выторфовка), имеющие целью уничтожение – нивелирование рельефа.

Итоги такого рода освоения окружают нас в повседневной действительности повсюду: вместо заявленной инвесторами на стадии привлечения вкладчиков элитной городской среды получаются «бетонные джунгли» новых кварталов, с момента возведения отягощенные старыми проблемами, среди которых нестабильность геологической среды, техногенная суффозия, ослабление несущей способности грунтов, подтопление и заболачивание, бездумно разбросанные тут и там «зачатки» озеленения (которым не суждено дoraсти до развитых древесных крон), отсутствие мест для отдыха, визуально агрессивная среда.

### *Пути совершенствования нормативной базы*

В целях улучшения положения изыскателей и предотвращения давления на них следовало бы предусмотреть возможность отрицательного (негативного) результата инженерно-экологических изысканий и последующие действия (приостановка работ, обсуждение вопроса о целесообразности их продолжения, возможном переносе на другую площадку или трассу) в типовой форме задания, что требует корректировки свода правил первого уровня. Там же следует рекомендовать первоочередное выполнение видов работ инженерно-экологических изысканий, при которых может быть выявлен негативный результат (десифрирование аэро- и космических снимков, рекогносцировка и/или маршрутные наблюдения, геоботанические и зоологические исследования по возможности до начала наиболее дорогостоящих работ), а также опережающее информирование заказчика об их результатах.

В целях повышения ответственности участников изыскательского процесса было бы целесообразно ввести дисциплинарную или административную ответственность изыскателей за намеренное искажение результатов изыскательских работ, а также работников государственных учреждений за невыполнение функций по предоставлению информативных ответов на официальные запросы.

В нормативных технических документах по инженерно-геологическим изысканиям следует предусмотреть обязательное определение при опробовании подземных вод не только параметров, важных для принятия технических решений, но и экологически важных характеристик.

В целом, вопрос об оптимальной последовательности выполнения разных видов изысканий для строительства и взаимодействии их исполнителей, требует дополнительного совместного рассмотрения.

## Список литературы

1. Колбовский Е.Ю. Ландшафтное планирование. М.: Академия, 2008. 336 с.
2. СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
3. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
4. Цымбал М.Н., Трофимов В.Т. Позиции, требующие совершенствования научно-методического обеспечения инженерно-экологических изысканий // Материалы XIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: ООО «Геомаркетинг», 2017. С. 172–175.

## V.I. Sturman

Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, st@izh.com

## PROBLEM OF NEGATIVE RESULT AT ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS AND THE POSSIBILITYES OF ITS DECISION

**Abstract.** The reasons, circumstances and consequences of negative results of engineering-ecological researches are considered. Suggestions for improvement of the regulatory base for minimization of consequences of negative results for customers and on improvement of interaction of performers of different types of researches for construction are presented.

**Key words:** engineering-ecological surveys; regulatory base of prospecting works; negative result; interaction of researches.

**Курбатова Е.С. Жуков Д.В.**

ООО «Газпром морские проекты», Управление экологического проектирования, изысканий и контроля,  
г. Москва, e.kurbatova@gazprom-seaprojects.ru

## **АЛГОРИТМ ВЫПОЛНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ. ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

**Аннотация.** В публикации рассмотрен общий алгоритм выполнения инженерно-экологических изысканий на основе нормативных технических документов СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96» и СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ». Подняты основные проблемные вопросы, такие как «добровольность» применения нормативных технических документов, составление программы работ, взаимодействие различных видов инженерных изысканий, организация внешнего и внутреннего контроля качества инженерных изысканий, приведены варианты решения вышеуказанных вопросов.

**Ключевые слова:** инженерно-экологические изыскания; программа работ; задание; внутренний контроль; внешний контроль.

Инженерно-экологические изыскания выполняются для получения материалов и данных о состоянии компонентов окружающей среды и возможных источниках ее загрязнения, необходимых для подготовки документов территориального планирования, документации по планировке территории, архитектурно-строительного проектирования, строительства и реконструкции зданий и сооружений.

Основными нормативными техническими документами, регламентирующими инженерно-экологические изыскания, являются СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96» [1] и СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [2]. Сводами правил установлены общие технические требования и правила производства инженерно-экологических изысканий для подготовки документов территориального планирования, документации по планировке территории и выбору площадок (трасс) строительства (обоснования инвестиций), при подготовке проектной документации объектов капитального строительства, строительстве и реконструкции зданий и сооружений. Документы в теории подробно и детально описывают алгоритм выполнения инженерно-экологических изысканий. Однако при практическом применении возникает ряд проблемных вопросов и противоречий.

Прежде всего, встает вопрос о «добровольном» применении вышеописанной нормативной документации.

Оба свода правил входят в перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается

соблюдение требований федерального закона № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [3].

Следует пояснить, что применение на добровольной основе стандартов и (или) сводов правил, включенных в перечень, является достаточным условием соблюдения требований соответствующих технических регламентов. В случае применения таких стандартов и (или) сводов правил для соблюдения требований технических регламентов оценка соответствия требованиям технических регламентов может осуществляться на основании подтверждения их соответствия таким стандартам и (или) сводам правил. Неприменение таких стандартов и (или) сводов правил не может оцениваться как несоблюдение требований технических регламентов. В этом случае допускается применение предварительных национальных стандартов, стандартов организаций и (или) иных документов для оценки соответствия требованиям технических регламентов.

Однако добровольность применения стандартов и сводов правил, включенных в перечень, не означает, что они могут не соблюдаться. Добровольность применения предоставляет возможность использования проектировщиками других правил, не противоречащих требованиям Федерального закона № 384-ФЗ [3].

Вторым проблемным вопросом и ключевым этапом в алгоритме выполнения инженерно-экологических изысканий является своевременная разработка, согласование и утверждение программы работ.

Выполнение полевых работ не должно допускаться заказчиком без согласования программы, что указано в п. 4.9 СП 502.1325800.2021 [1]. Несмотря на то, что данное правило закреплено в нормативной документации, им часто пренебрегают, что приводит к получению неполноценных или недостоверных результатов работ. Существует несколько путей решения данного вопроса:

1) выделение в календарном плане отдельного этапа на составление программы работ с четким указанием сроков выполнения, предшествующим началу полевых работ;

2) включение в задание обязательного пункта о предоставлении согласованной программы заказчику до начала полевых работ и уведомления о мобилизации;

3) недопущение приемки отчетных материалов подрядчика без согласованной программы работ.

Следует отметить, что некачественно составленная программа работ приводит к недостоверным или неполным результатам в техническом отчете, что в свою очередь влечет за собой необходимость дополнительных полевых работ, затрат трудовых и временных ресурсов.

Третим немаловажным вопросом является взаимодействие разных видов изысканий: инженерно-геологических, инженерно-экологических, инженерно-гидрометеорологических и инженерно-геодезических. П. 4.5 СП 502.1325800.2021

[1] допускает использование материалов других видов изысканий для решения задач инженерно-экологических изысканий.

Однако у перечисленных видов изысканий разные цели и задачи, подходы к исследованию компонентов окружающей среды, сроки проведения работ и зона исследований.

Зачастую также данный пункт трактуется исполнителем, как разрешение не делать часть исследований, переложив их в зону ответственности других инженерных изысканий.

Все это приводит к ухудшению качества работы: срыву сроков, неточности данных, невозможности получения необходимых и достаточных материалов для проектирования.

Чтобы минимизировать риски и повысить качество работ предлагается:

1) откорректировать п. 4.5 СП 502.1325800 [2], указав, что сведения, получаемые из отчетов по другим видам инженерных изысканий, могут быть использованы лишь в качестве дополнения к текущему исследованию;

2) выстраивать план работ, таким образом, чтобы различные инженерные изыскания дополняли друг другу, но не противоречили;

3) обеспечить постоянный контакт между организациями или подразделениями на всех этапах инженерных изысканий: от написания программы работ до составления камерального отчета;

4) ввести внешний единый контроль, задачей которого было бы выявление несоответствий между различными видами инженерных изысканий.

Наконец, одним из самых важных вопросов остается нерешенная проблема внешнего и внутреннего контроля качества инженерных изысканий. Согласно п. 4.9 СП 47.13330.2016 [1] исполнитель инженерных изысканий обязан обеспечивать внутренний контроль качества выполнения и приемку полевых, лабораторных и камеральных работ. В то же время, согласно п. 4.10, внешний контроль качества выполнения инженерных изысканий осуществляется застройщиком, техническим заказчиком собственными силами или с привлечением независимых организаций. Таким образом, в вышеуказанном изложении п. 4.10 не несет обязательный характер и трактуется, как рекомендация.

Отсутствие четких требований к выполнению внешнего и внутреннего контроля приводит к формализации данных процессов, ухудшению качества инженерных изысканий.

Для решения данной проблемы необходимо в нормативной документации четко прописать требования к акту внутреннего и внешнего контроля. Например, обязательным приложением к актам должны быть: утвержденная программа работ, ведомость со сводным объемом работ, с указанием причин отклонения от программы, фотогалерея площадок комплексного описания ландшафтов – ПКОЛ (фотографии ландшафта и почвенного разреза), фотогалерея с выполнением каждого вида работ (отбор проб, полевые измерения, описания и др.), бланки

описания ПКОЛ, бланки описания почвенного разреза и растительного покрова, акты отбора проб, картосхема фактического материала.

Также для организации внешнего контроля рекомендуются выезды специалистов супервайзеров с полевой бригадой со стороны заказчика или со стороны сторонней организации. Данный шаг хоть и увеличит затраты, позволит улучшить качество работ и впоследствии позволит сэкономить на дополнительных выездах в случае обнаружения недостатков на этапе приемки полевых работ.

Таким образом, основной целью выполнения инженерных изысканий является комплексное изучение природных условий территории (региона, района, площадки, участка, трассы) и факторов техногенного воздействия на территорию объектов капитального строительства. Для проведения полноценных комплексных инженерных изысканий необходимо усовершенствовать нормативную и методическую базы, установить четкое разделение видов, сроков работ и ответственности между инженерно-геологическими, инженерно-экологическими, инженерно-гидрометеорологическими и инженерно-геодезическими изысканиями, а также внутри каждого вида, подготовить четкие требования к внутреннему и внешнему контролю качества инженерных изысканий.

Только полный комплексный подход при инженерно-экологических изысканиях даст возможность получать достоверные результаты, которые будут служить базой при обосновании мероприятий по охране окружающей среды, предотвращению, снижению или ликвидации неблагоприятных воздействий, а также по сохранению, восстановлению и улучшению экологической обстановки для создания благоприятных условий жизнедеятельности человека, среды обитания растений и животных, принять решения по организации и проведению экологического мониторинга.

## Список литературы

1. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96».
2. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
3. Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

**E.S. Kurbatova, D.V. Zhukov**

Gazprom morskie proekty LLC, Moscow, e.kurbatova@gazprom-seaprojects.ru

## **ALGORITHM OF ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS. THE PROBLEMS AND THE KEYS TO THEIR SOLUTIONS**

**Abstract.** The report discusses the general algorithm for engineering and environmental surveys based on regulatory documents SP 47.13330.2016 “Engineering survey for construction. Basic principles. Updated version of SNiP 11-02-96” and SP 502.1325800.2021 “Engineering environmental survey for construction. General regulations for execution of work”. The main problems are raised, such as the “voluntary” application of regulatory documents, making survey program, interaction between different types of surveys, organization of external and internal quality control of engineering surveys, and the keys to their solution.

**Key words:** engineering-ecological surveys; making a program of work; technical brief; internal control; external control.

## Обатнин В.А.

Санкт-Петербургский филиал ООО «Газпром проектирование», г. Санкт-Петербург, vobatnin@mail.ru

### СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ О ФОНОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЫШЬЯКА В ПОЧВАХ

**Аннотация.** В работе дана краткая характеристика авторской базы данных, составленной на основе открытых источников и содержащей сведения о фоновых концентрациях химических элементов в почвах ряда территорий России. Проанализированы основные принципы определения геохимического фона, а также отмечены некоторые нюансы, связанные с использованием указанных сведений на практике. Работа может быть полезна при оценке загрязненности почв в ходе проведения инженерно-экологических изысканий.

**Ключевые слова:** цинк; кадмий; свинец; ртуть; медь; никель; мышьяк.

Инженерно-экологические изыскания предполагают расчет суммарного показателя химического загрязнения почв и грунтов  $Z_c$  в соответствии с п. 5.11.12, 5.11.13 СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [32]. Для расчета необходимо знать фоновое содержание химических элементов в почвах, эти данные можно получить путем отбора фоновых проб. Более простым (а в теории – и более точным) методом, прописанным в своде правил, может быть использование региональных фоновых значений из научно-исследовательских или справочных материалов.

Однако не на всей территории России исследовались фоновые концентрации элементов в почвах, а если такие исследования проводились, не всегда можно быстро найти соответствующую статью или справочник. Поэтому было решено составить базу данных со ссылками на известные автору материалы по данной теме. Всего было проанализировано более 60 источников, ознакомиться с результатом проделанной работы можно по ссылке: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1-OilrvFJqHJKxWIHQfjfYmYmzHipHmJeB-JnS6f8HM8/edit#gid=0>.

В базе данных зафиксирована следующая информация:

– название источника данных, его тип (статья, ежегодник и др.), номер страницы или таблицы с необходимыми данными;

– наличие/отсутствие данных по семи химическим элементам (Zn, Cd, Pb, Hg, Cu, Ni, As), обязательных для определения в почвах согласно п. 120 СанПин 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организаций и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (с изменениями и дополнениями)» [29] и п. 5.25.2 СП 502.1325800.2021 [32];

- наличие/отсутствие данных по другим элементам;
- количество отобранных проб;
- глубины или горизонты отбора проб;
- характеристика точек отбора проб (частота расположения точек на местности, удаленность от источников загрязнения, тип ландшафта или категория земель);
- год проведения исследования;
- метод лабораторного анализа отобранных проб, а также растворитель, применяемый для разложения образцов;
- результат представления данных (особенности математической обработки полученных значений, наличие/отсутствие данных по отдельным типам почв, ландшафтным или административным единицам);
- дополнительные примечания и комментарии.

Все исследования в базе данных разделены по охвату территории на макрорегиональные, региональные и микрорегиональные. В случае, если территория проведения инженерно-экологических изысканий попадает в зону нескольких исследований с разным уровнем охвата, рекомендуется в первую очередь использовать результаты более локальных исследований.

Также база данных сопровождена картографическим материалом. На трех картах обозначены приблизительные границы исследований фоновых концентраций в почвах на макрорегиональном, региональном и микрорегиональном уровнях соответственно. На четвертой карте проведена попытка «объединить» все исследования и указать для каждого участка территории общее количество элементов (из семи обязательных для определения), по которым имеются фоновые концентрации.

Для примера рассмотрены почвы Астраханской области. Н.А. Богданов [1] приводит региональный фон по шести из семи обязательных для определения элементов (кроме кадмия). В документе «Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства» [21] указаны фоновые концентрации кадмия в бурых почвах. В ежегодниках «Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ» [10] указаны фоновые концентрации кадмия в аллювиальных луговых почвах Астраханского биосферного заповедника, которые с некоторыми оговорками можно распространить на все аллювиальные луговые почвы Астраханской области. Таким образом, для почв значительной части региона известны фоновые концентрации по всем семи элементам, и отбор фоновых проб при проведении инженерно-экологических изысканий может не потребоваться.

При составлении базы данных большое внимание уделялось методике определения фоновых концентраций у разных исследователей. Так, выбор точек опробования во многом зависел от того, как исследователь понимает понятие «геохимический фон». Д.В. Иванов [14] отмечает, что в нормативной базе России нет единого определения, описывающего фоновое содержание веществ в почве.

В качестве примеров двух «крайних» точек зрения можно привести следующие действующие нормативные технические документы:

1. ГОСТ 27593-88 «Фоновое содержание вещества в почве – это содержание вещества в почве, соответствующее ее природному составу» [6].

2. МУ 2.1.7.730-99 «Фоновое содержание (загрязнение) – содержание химических веществ в почвах территорий, не подвергающихся техногенному воздействию или испытывающих его в минимальной степени» [22].

Опираясь на данные определения, можно оценить несколько подходов к исследованию геохимического фона.

В ряде исследований [7, 34, 36] фоновые пробы отбирались исключительно в пределах особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Данный подход соответствует терминологии о фоновом содержании как ГОСТ 27593-88 [6], так и МУ 2.1.7.730-99 [22]. Однако возникает вопрос о достаточности или недостаточности точек опробования для экстраполяции фоновых концентраций на почвы всего региона. Так, при исследовании фоновых концентраций в почвах Пермского края [7] обследовалось 92 участка в пределах ООПТ, при исследовании фона в почвах Ростовской области [36] – 17 подобных участков, при исследовании фона в почвах Кировской области [34] – 4 участка. В работе Т.А. Парамоновой и ее коллег [24] приводится расчет среднего содержания металлов в дерново-подзолистых почвах Центрального федерального округа по результатам исследований на территории трех ООПТ. Очевидно, что в последнем случае для такой обширной территории недостаточно трех площадок опробования, поэтому подобное «осреднение» фоновых значений не рекомендуется использовать при проведении инженерно-экологических изысканий.

В большинстве исследований [2, 16, 33] фоновые пробы отбирались в природных (естественных) ландшафтах, удаленных от источников загрязнения. При этом в ряде работ [8, 11, 23] проводилось предварительное деление всей территории региона на естественные и на техногенно-преобразованные ландшафты. Данный подход также не противоречит терминологическому аппарату ГОСТ 27593-88 [6] и МУ 2.1.7.730-99 [22].

В некоторых исследованиях [5, 26] в общую фоновую выборку попадали техногенно-незагрязненные почвы, отобранные как в естественных ландшафтах, так и на пашне. Как правило, данный подход применяется в регионах юга России, где сельскохозяйственные земли занимают значительные площади территории. Посредством применения удобрений и пестицидов сельскохозяйственная деятельность частично изменяет химический состав почв, однако эти изменения в целом слабее воздействия от техногенных источников. Кроме того, указанные изменения химического состава частично сглаживаются опробованием естественных почв. Таким образом, получившаяся выборка в целом соответствует определению «фоновое содержание» из МУ 2.1.7.730-99 [22]. Соответствующие исследования были внесены в базу данных.

Здесь же можно выделить территории, где на фоновое содержание химических элементов обследовались исключительно пахотные почвы, удаленные от источников техногенных выбросов [3, 19]. Предлагается использовать эти данные при проведении инженерно-экологических изысканий на землях сельскохозяйственного назначения и не применять по отношению к естественным почвам.

В некоторых исследованиях [15] понятие «фон» приравнивалось к понятиям «кларк» или «среднее». В этом случае производилось опробование почв как удаленных, так и приближенных к участкам техногенного воздействия, затем рассчитывалось среднее содержание элементов в почвах. Данный подход не соответствует определению «фоновое содержание» из ГОСТ 27593-88 [6] и МУ 2.1.7.730-99 [22], данные исследования не были включены в базу данных. Также в базу не вошли исследования [4, 27], где приводилось среднее содержание химических элементов в почвах без четкого указания особенностей отбора проб.

Среди других подходов определения фонового содержания элементов в почвах можно отнести следующие:

– использование в качестве фона содержание химических элементов в «эталонных» почвах региона. Так, для Белгородской области за эталон принимаются почвы из заповедника «Ямская степь», занесенные в Красную книгу почв региона [31]. Для Курской области за эталон принимается официально зарегистрированный стандартный образец СП-1: Курский Чернозем [30]. В отличие от всех остальных подходов, в данном случае отсутствует какая-либо выборка проб, для каждого типа почв установлен один «эталонный» разрез. При этом данный подход был применен в ряде научных работ, в т.ч. в нескольких кандидатских диссертациях [12, 20];

– использование в качестве фона содержание химических элементов в почвообразующей породе. В частности, данный подход в своей работе использовал Ю.А. Мажайский [18].

Помимо особенностей отбора проб, при создании базы данных уделялось внимание методам лабораторного химического анализа. Поскольку предельно допустимая концентрация химических элементов в почве определена для их валового содержания [28], в ходе проведения инженерно-экологических изысканий в пробах также определяется валовая форма металлов и мышьяка. Соответственно, требуется знать фоновые концентрации именно валовой формы химических элементов. Таким образом, в базу данных не включались исследования [9, 13, 18], в которых фоновые пробы обрабатывались пятимольным раствором азотной кислоты ( $5M HNO_3$ ), т.е. где определялась их кислоторастворимая, а не валовая форма [17, 25].

В ряде исследований, проведенных в 1990-е и в 2000-е гг. [5, 31, 35], для разложения проб при проведении анализа применялась смесь концентрированной азотной кислоты и концентрированной перекиси водорода ( $HNO_3$  (1:1) +  $H_2O_2$  конц.). При этом исследователи ссылаются на [21], где

подобный метод предлагается для определения валовой формы металлов. Согласно более современным методикам ПНД Ф 16.1:2:3:3.11-98 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой» [25] и М-МВИ 80-2008 «Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложений методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии» [17], указанные растворители позволяют определить кислоторастворимую форму элементов, а для определения их валового содержания требуется совместное использование сильных кислот ( $\text{HNO}_3$  конц. +  $\text{HF}$  конц. +  $\text{HCl}$  конц.). Было решено включить в базу данных исследования, в которых содержание металлов определялось при помощи азотной кислоты и перекиси водорода, добавив соответствующее пояснение. Также в базу данных был включен ряд источников, в которых идет речь про определение валовых форм элементов в почве, но не указан способ разложения проб.

Подводя итог, можно отметить, что составленная база данных окажется полезна при проведении инженерно-экологических изысканий, при этом необходимо обращать пристальное внимание на методику проведения указанных исследований. В дальнейшем планируется проведение планомерная и детальная корректировка и дополнение базы данных.

### Список литературы

1. Богданов Н.А., Чуйков Ю.С., Рыбкин В.С. Метод оценки состояния земель по индексу загрязнения почв // Астраханский вестник экологического образования. 2013. № 1(23). С. 102–112.
2. Волгин Д.А. Фоновый уровень и содержание тяжелых металлов в почвенном покрове Московской области // Вестник МГОУ. 2011. № 1. С. 26–33.
3. Волошин Е.И. Особенности фонового содержания микроэлементов в пахотных почвах Красноярского края // Вестник КрасГАУ. 2012. № 5(68). С. 147–149.
4. Голов В.И. Содержание микроэлементов и тяжелых металлов в пахотных почвах Дальнего Востока // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2010. № 4. С. 16–19.
5. Горбунова Н.С. Формы соединений марганца, меди, цинка, никеля, свинца и кадмия в черноземах Центрально-Черноземного региона: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2005. 24 с.
6. ГОСТ 27593-88 Почвы. Термины и определения.
7. Дзюба Е.А. Определение местного фонового содержания некоторых макро- и микроэлементов в почвах Пермского края // Географический вестник. 2021. № 1(56). С. 95–108.

8. Дьяченко В.В. Геохимия и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа: автореф. дис... докт. геогр. наук. Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского государственного университета, 2004. 49 с.
9. Ежегодники «Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения». Обнинск: Изд-во ФГБУ «НПО “Тайфун”», 2006–2021.
10. Ежегодники «Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ». М.: Изд-во Института глобального климата и экологии, 2010–2021.
11. Жуков В.Д. Закономерности распределения некоторых тяжелых металлов в агроландшафтах Западного Предкавказья: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2005. 20 с.
12. Золототрубов Е.Б. Геоэкологическая оценка территории Михайловского промышленного района: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2007. 23 с.
13. Иванов Д.В. Региональные фоновые концентрации загрязняющих веществ в системе мониторинга окружающей среды в Республике Татарстан // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29. № 2. С. 118–134.
14. Иванов Д.В. Фоновое содержание загрязняющих веществ как мера нормирования качества природных сред (обзор) // Российский журнал прикладной экологии. 2021. № 4(28). С. 55–66.
15. Копылов И.С. Геоэкология, гидрогеология и инженерная геология Пермского края. Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 2021. 501 с.
16. Лукинова С.И. Эколого-агрономическая характеристика почв сельскохозяйственных угодий Вологодской области // Материалы научно-практической конференции «Научное обеспечение охраны окружающей среды и рационального использования». Вологда, 1997. С. 33–43.
17. М-МВИ 80-2008 Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложений методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии.
18. Мажайский Ю.А. Особенности распределения тяжелых металлов в профилях почв Рязанской области // Агрохимия. 2003. № 8. С. 74–79.
19. Матинян Я.Н., Рейманн К., Бахматова К.А., Русаков А.В. Фоновое содержание тяжелых металлов и мышьяка в пахотных почвах Северо-Запада России (по материалам международного геохимического атласа) // Вестник СПбГУ. Серия 3. Биология. 2007. № 3. С. 123–134.
20. Меленцова С.В. Агроэкологическая оценка содержания химических элементов S, Zn, Mn, Cu, Cd, Pb в почвах лесостепной и степной зон (на примере Белгородской области): автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: Российский государственный аграрный университет, 2007. 22 с.

21. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства. М.: Минсельхоз России, 1992. 62 с.
22. МУ 2.1.7.730-99 Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест.
23. Очур-оол А.О. Эколого-геохимическое состояние ландшафтов Хемчикской котловины (Западная Тыва): дис. ... канд. геогр. наук. Томск: Томский государственный университет, 2016. 175 с.
24. Парамонова Т.А., Парамонов С.Г., Черногаева Г.М. Фоновое содержание приоритетных экотоксикантов в почвах Центрального федерального округа // Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН «Почвы в биосфере». Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2018. Ч. 1. С. 354–358.
25. ПНД Ф 16.1:2:3:3.11-98 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.
26. Прохорова Н.В. К оценке фоновой геохимической структуры ландшафтов лесостепного и степного Поволжья // Известия Самарского научного центра РАН. 2005. Т. 7. № 1. С. 169–178.
27. Пузанов А.В. Приоритетные микроэлементы (I, Se, Mn, Co, Cu, Zn, Hg) в наземных экосистемах Тувинской горной области: автореф. дис. ... докт. биол. наук. Новосибирск: Новосибирский государственный аграрный университет, 2005. 44 с.
28. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
29. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организаций и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (с изменениями и дополнениями).
30. Свидетельство на стандартный образец СП-1: (Курский чернозем) № 901-90 (ООКО152) по Государственному реестру мер и измерительных приборов СССР (раздел «Стандартные образцы»).
31. Соловиченко В.Д., Лукин С.В., Лисецкий Ф.Н., Голеусов П.В. Красная книга почв Белгородской области. Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. 139 с.
32. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
33. Стурман В.И., Логиновская А.Н. Фоновые концентрации контролируемых при инженерно-экологических изысканиях тяжелых металлов (свинец, кадмий, цинк, медь, никель, мышьяк, ртуть) в поверхностном слое почв

Удмуртии // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о  
Земле. 2020. Т. 30. № 3. С. 285–294.

34. Сюткин В.М. Экологический мониторинг административного региона (концепция, методы, практика на примере Кировской области). Киров: Изд-во ВГПУ, 1999. 232 с.
35. Тяжелые металлы в почвах Карелии / Отв. ред. Г.В. Ахметова. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2015. 222 с.
36. Чернова О.В., Безуглова О.С. Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв // Почвоведение. 2019. № 8. С. 1015–1026.

### **V.A. Obatnin**

Saint Petersburg Branch of Gazprom proektirovanie LLC, Saint Petersburg, vobatnin@mail.ru

## **CREATION OF THE DATABASE ON BACKGROUND CONCENTRATIONS OF HEAVY METALS AND ARSENIC IN SOILS**

**Abstract.** The study provides a brief description of the author's database, compiled on the basis of open sources and containing information on the background concentrations of chemical elements in the soils of some territories of Russia. The basic principles of determining the geochemical background are analyzed and some nuances associated with the use of this information in practice are noted. The study may be useful in assessing soil pollution when conducting environmental engineering surveys.

**Key words:** zinc; cadmium; lead; mercury; copper; nickel, arsenic.

**Митрофанова М.А., Косинова И.И.**

Воронежский государственный университет, геологический факультет, кафедра экологической геологии,  
г. Воронеж, marfa-mma@mail.ru

## **НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПОЧВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Аннотация.** Опыт проведения инженерно-экологических изысканий в Арктической зоне РФ, в частности на территориях обустройства нефтегазоконденсатных месторождений в Ямало-Ненецком автономном округе, показывает несовершенство существующих нормативных требований к оценке почвенного покрова. Почвы участков инженерно-экологических изысканий в этой местности зачастую не соответствуют требованиям к плодородному слою, установленным в нормативных технических документах. Авторами предлагается альтернативный биоцентрический подход к оценке почвенного покрова при проведении инженерно-экологических изысканий с целью принятия проектных решений по защите участков с максимальным почвенным эколого-ресурсным потенциалом.

**Ключевые слова:** исследования почвенного покрова; инженерно-экологическая оценка почв; эколого-ресурсный потенциал почв.

Многолетний опыт проведения инженерно-экологических изысканий в Арктической зоне РФ, в частности на территориях обустройства нефтегазоконденсатных месторождений (НКГМ) в Ямало-Ненецком автономном округе, показывает несовершенство существующих нормативных требований к оценке почвенного покрова с точки зрения целесообразности почв для снятия, хранения и рекультивации. Результаты химического анализа почв на агрохимические показатели зачастую свидетельствуют о несоответствии их величин указанным в государственных стандартах (ГОСТ 17.5.3.06-85 «Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ» [2], ГОСТ 17.5.1.03-86 «Охрана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель» [1] и др.) значениям, таким образом дальнейшие проектные решения не предусматривают мероприятий по охране тундровых почв.

В альтернативу сложившегося антропоцентрического подхода предлагается новый биоцентрический, основанный на оценке эколого-ресурсного потенциала почв. Данное понятие введено авторами для обозначения способности почв в максимально возможном объеме осуществлять функции, связанные с естественным плодородием и возобновлением природных экосистем [4, 5].

При определении эколого-ресурсного потенциала почвы рассматриваются как основной субстрат для развития экосистем в условиях, характерных для Арктической зоны РФ.

Для разработки нового биоцентрического методического подхода к оценке почв на стадии проведения инженерно-экологических изысканий решались следующие задачи: 1) систематизация данных инженерно-экологических изысканий, выполненных в пределах участков обустройства Уренгойского НГКМ, территории которого весьма репрезентативна с позиций своего субмеридионального простирания; 2) выбор количественных критериев оценки из массива данных, получаемых при инженерно-экологических изысканий; 3) разработка системы ранжирования участков обследования по величине интегрального индекса экологого-ресурсного потенциала почв.

Для выбора количественных критериев оценки проанализированы результаты проведения инженерно-экологических изысканий на участках обустройства Уренгойского НГКМ в период 2015–2021 гг. в части исследований почвенного и растительного покрова путем заложения и дальнейшего описания почвенных разрезов и площадок комплексного описания ландшафтов (ПКОЛ), а также лабораторного анализа агрохимических параметров почв. Для удобства статистической обработки из массива данных выбрано 100 ПКОЛ вдоль условного субмеридионального разреза месторождения, проходящего через два географических пояса (Бореальный и Полярный, [3]).

Экспертным методом определены весовые показатели для оценки экологого-ресурсного потенциала почв, отраженные в табл.

Таблица  
 Критерии количественной оценки экологого-ресурсного потенциала почв АЗРФ на примере участков обустройства Уренгойского НГКМ

Критерии оценки эколого-ресурсного потенциала почв	Ранги эколого-ресурсного потенциала почв	I. Высокий (зона экологической нормы)	II. Средний (зона экологического риска)	III. Низкий (зона экологического кризиса)	IV. Очень низкий (зона экологического бедствия – катастрофы)
1. Глубина залегания многолетнемерзлых пород на момент проведения инженерно-экологических изысканий, см	более 45,0 либо отсутствие	45,0–31,0	31,0–23,5	менее 23,5	
2. Содержание органического вещества, % для минеральных горизонтов / % для органогенных горизонтов	более 13,15/более 46,70	13,50–6,01/46,70–26,70	6,01–2,30/26,70–14,20	менее 2,30/менее 14,20	

Критерии оценки эколого-ресурсного потенциала почв	Ранги эколого-ресурсного потенциала почв			
	I. Высокий (зона экологической нормы)	II. Средний (зона экологического риска)	III. Низкий (зона экологического кризиса)	IV. Очень низкий (зона экологического бедствия – катастрофы)
3. Величина pH водной вытяжки, ед. pH	6,13–5,23	5,23–4,73	4,73–4,18	менее 4,18
4. Величина pH солевой вытяжки, ед. pH	5,05–4,26	4,26–3,75	3,75–3,28	менее 3,28
5. Общее проективное покрытие, %	100	100–50	50–10	менее 10
Интегральная оценка, балл	1	1–2	2–3	3–4

Для количественной оценки данных критериев, кроме степени проективного покрытия, был использован статистический метод классификации естественных разрывов Джэнкса. Границы четырех рангов эколого-ресурсного потенциала по выбранному критерию создавались путем программирования на языке R с использованием интерфейса RStudio таким образом, чтобы сгруппировать схожие значения и максимизировать различия между рангами (<https://pro.arcgis.com>). Данный метод кластеризации заключается в вычислении суммы квадратов отклонений от средних значений класса (градации) и подборе способа разделения на классы, при котором перемещение одной или нескольких точек из одного класса в другой приводит к тому, что сумма отклонений внутри класса приобретает минимальное значение. При этом достигается минимальная дисперсия внутри выделенных градаций и максимальная между ним.

Количественные градации показателя проективного покрытия предложены в публикации М.Ю. Телятникова [6].

Для интегральной оценки эколого-ресурсного потенциала почв всем указанным в табл. критериям путем соответствующих обоснований присвоены весовые коэффициенты.

Наибольший весовой коэффициент – 0,4 присвоен показателю, определяющему глубиной залегания многолетнемерзлых пород на момент заложения почвенного разреза ( $R_{ММР}$ ), что обусловлено протеканием процессов почвообразования в сезонно-талом слое.

Весомость остальных показателей определяется уровнем дифференциации территории по количественным характеристикам: менее 50% рассмотренных ПКОЛ отнесены к одной из категорий эколого-ресурсного потенциала по показателям pH водной ( $R_{pH_{вод}}$ ) и солевой ( $R_{pH_{сол}}$ ) вытяжки (по 0,2 из 1,0), более 50% – к одному из рангов эколого-ресурсного потенциала по критериям «содержание органического вещества» ( $R_{орг\,в-во}$ ) и «проективное покрытие» ( $R_{пп}$ ) (по 0,1 из 1,0). Таким образом, интегральный индекс эколого-ресурсного

потенциала почв участков Арктической зоны РФ, аналогичных рассмотренному по природно-климатическим и геокриологическим условиям, выражается формулой:

$$I = (R_{\text{ММП}} \cdot 0,4) + (R_{\text{рНсол}} \cdot 0,2) + (R_{\text{рНвод}} \cdot 0,2) + (R_{\text{орг в-во}} \cdot 0,1) + (R_{\text{пп}} \cdot 0,1).$$

Наибольшим эколого-ресурсным потенциалом по выбранной балльной классификации должны обладать участки с интегральным индексом, равным 1 баллу, а наименьшим – 4 баллам.

Результаты интегральной оценки почвенного покрова изысканных участков обустройства Уренгойского НГКМ свидетельствуют об отсутствии почвенных выделов с высоким эколого-ресурсным потенциалом, поэтому наибольшим эколого-ресурсным потенциалом обладают почвы в зоне, эквивалентной экологическому риску (средний эколого-ресурсный потенциал почв) с наименьшими интегральными баллами – 1,3–1,5. В южной части месторождения в пределах Бореального географического пояса преобладают участки с почвами среднего и низкого эколого-ресурсного потенциала, а к северу от Полярного круга в пределах Арктического географического пояса чаще встречаются территории с очень низким эколого-ресурсным потенциалом почв.

В ходе экологического проектирования, а именно разработки томов оценки воздействия на окружающую среду, перечня мероприятий по охране окружающей среды для почв с высоким и средним уровнями эколого-ресурсного потенциала должен разрабатываться комплекс рекомендаций по охране, защите и рекультивации. Предлагаемый методический подход к инженерно-экологической оценке почв участков обустройства Уренгойского НГКМ актуален для территорий Арктической зоны РФ с аналогичными природно-климатическими и геокриологическими условиями.

## Список литературы

1. ГОСТ 17.5.1.03-86 Охрана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель.
2. ГОСТ 17.5.3.06-85 Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ.
3. Добровольский Г.В., Урусевская И.С. География почв, 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Московского университета, 2004. 458 с.
4. Митрофанова М.А., Косинова И.И. Методика оценки почв Арктической зоны на основе их эколого-ресурсного потенциала // Материалы Десятого международного молодежного инновационного проекта «Школа экологических перспектив». Воронеж: Научная книга, 2023. С. 95–105.
5. Митрофанова М.А., Косинова И.И. Методический подход к оценке почв Арктической зоны на основе данных инженерно-экологических изысканий

Уренгойского НГКМ // Проектирование и разработка нефтегазовых месторождений. 2023. № 1. С. 28–35.

6. Телятников М.Ю. Растительность типичных тундр полуострова Ямал / Под ред. В.П. Седельникова. Новосибирск: Наука, 2003. 122 с.

**M.A. Mitrofanova, I.I. Kosinova**

Voronezh State University, Voronezh, marfa-mma@mail.ru

## **NEW APPROACHES TO SOIL ASSESSMENT WHEN CONDUCTING ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS IN THE ARCTIC ZONE**

**Abstract.** The experience of conducting engineering-ecological surveys in the Arctic zone of the Russian Federation, in particular in the territories where oil and gas condensate fields are being developed in the Yamal-Nenets Autonomous Okrug, shows the imperfection of existing regulatory requirements for assessing soil cover. The soils of survey sites in this area often do not meet the requirements for the fertile layer established in regulatory documents. The authors propose an alternative biocentric approach to assessing soil cover during engineering-ecological surveys in order to make design decisions to protect areas with maximum soil ecological and resource potential.

**Key words:** soil cover research, engineering-ecological assessment of soils, ecological resource potential of soils.

**Кузиков А.А., Сущенко О.А.**

АО «НИПИГАЗ», г. Краснодар, kuzikovaa@nipigas.ru

**К ВОПРОСУ ОРГАНИЗАЦИИ ПОДХОДА К ПРОВЕДЕНИЮ  
ИССЛЕДОВАНИЙ РАДОНООПАСНОСТИ И ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ГРУНТОВ ТЕРРИТОРИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ОБЪЕКТОВ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ  
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ  
И ПРЕДЛОЖЕНИЯ К КОРРЕКТИРОВКЕ ПОЛОЖЕНИЙ  
СП 502.1325800.2021**

**Аннотация.** Организация и проведение исследований радиоопасности и газогеохимических исследований грунтов территории изысканий с учетом выделения этапов работ, позволит оптимизировать сроки и бюджет выполнения работ при условии внесения изменений в СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ», устанавливающий требования к выполнению работ при инженерно-экологических изысканиях.

**Ключевые слова:** инженерно-экологические изыскания; инструментальные исследования; исследования радиоопасности; газогеохимические исследования; этапность работ.

В ходе производства инженерно-экологических изысканий для разработки проектной документации для объектов строительства зданий и сооружений промышленных предприятий, выполняются исследования радиоопасности, газогеохимические исследования грунтов территории изысканий.

С учетом опыта АО «НИПИГАЗ» в организации и проведения исследований радиоопасности и газогеохимических исследований грунтов территории изысканий показана возможность оптимизации сроков и бюджета выполнения работ при условии внесения изменений в СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [4], устанавливающий требования к выполнению работ при инженерно-экологических изысканиях.

В случае выделения первого этапа исследований, включающего сокращенный перечень работ, целью которого будет являться установление факта наличия радоновой и газогеохимической опасности, при обнаружении безопасного уровня факторов по результату исследований, возможно достоверно исключить необходимость проведения второго этапа, при отсутствии превышений показателей по результатам первого этапа.

Проведение дальнейших исследований при этом нецелесообразно.

Рассмотрена возможность организации работ с учетом подтвержденного факта наличия предмета для исследований.

В ходе планирования производства инженерно-экологических изысканий на объекте, в программе работ необходимо предусматривать исследования грунтов территории в части:

– радиоопасности, в случае, когда на земельном участке планируется строительство жилых, общественных, производственных зданий и сооружений с постоянным пребыванием в них людей (непрерывно, в течение более 2 ч) [4, п. 5.15.12];

– газогеохимические исследования, в случае наличия на участке изысканий: насыпных грунтов с примесями строительного мусора мощностью более 2 м, несанкционированных свалок, полигонов твердых коммунальных и промышленных отходов, депонирования осадков сточных вод, подземных хранилищ газа. Возможно выполнение данных исследований на участках распространения природных органоминеральных и органических грунтов (при обосновании необходимости проведения таких исследований в программе работ) [4, п. 5.18.1].

Данные исследования включают обширный комплекс работ, к примеру, при оценке потенциальной радиоопасности территории и определении исходных данных для проектирования противорадоновой защиты выполняют комплекс работ:

– полевые измерения плотности потока радона с поверхности грунта согласно [1, п. 5.1] на участке планируемой застройки согласно [2, п. 6.2];

– отбор проб грунта из разнородных литологических слоев в пробуренных на участке скважинах (за исключением почвенно-растительного слоя) и проведение лабораторных измерений их радиационно-физических характеристик;

– расчетное определение плотности потока радона согласно [1, п. 7.2] на участке с использованием данных о радиационно-физических характеристиках грунтов в геологическом разрезе;

– выявление аномально высоких потоков радона из грунта по результатам сопоставления измеренных и расчетных значений плотности потока радона;

– оценку соответствия показателей радиоопасности участка установленным требованиям.

Перечень работ и требования к составу работ, выполняемых в рамках газогеохимических исследований в СП 502.1325800.2021 [4] по сравнению с СП 11-102-97 «Инженерные изыскания для строительства» [3] также существенно расширены, газогеохимические исследования согласно [4, п. 5.18] включают:

- шпуровую съемку;
- эмиссионную съемку;
- отбор проб грунтового воздуха и приземной атмосферы;
- скважинные газогеохимические исследования (с поглубинным отбором проб свободного грунтового воздуха);
- скважинные газогеохимические исследования (с отбором проб грунтового воздуха из-под накопительного колпака);
- расчет дебита биогаза из скважин;
- определение эмиссии биогаза из грунтового массива;
- лабораторное определение газогенерационной способности грунтов;

- лабораторные исследования компонентного состава свободного грунтового воздуха;
- лабораторные исследования газовой фазы грунтов и биогаза.

На основании опыта проведения инженерно-экологических изысканий нами отмечено, что основными причинами необходимости производства газогеохимических исследований на территориях действующих промышленных предприятий, являются:

- наличие насыпных грунтов с примесями строительного мусора мощностью более 2 м;
- наличие грунтов с включением органического вещества.

Выводы о наличии насыпных грунтов на участке принимаются по результатам анализа буровых геологических журналов и в последующем, геолого-литологических колонок скважин (рис. 1).

I. В первый этап исследований радиоопасности предлагается включить: полевые измерения плотности потока радона, оценку соответствия показателей радиоопасности участка установленным требованиям. В случае обнаружения радиационных аномалий проводить второй этап детальных исследований в объеме, включающем отбор проб грунта, и проведение лабораторных измерений их радиационно-физических характеристик, расчетное определение плотности потока радона, выявление аномально высоких потоков радона.

В связи с вышеизложенным, предлагается внесение следующих изменений в [4, п. 5.15.12.2]:

«при оценке потенциальной радиоопасности территории и определении исходных данных для проектирования противорадоновой защиты на первом этапе инженерно-экологических изысканий выполняют:

- полевые измерения плотности потока радона с поверхности грунта согласно [1, п. 5.1] на участке планируемой застройки в соответствии с [2, п. 6.2];
- оценку соответствия показателей радиоопасности участка установленным требованиям.

В случае выявления радиационных аномалий (повышенного фона), на втором этапе инженерно-экологических изысканий дополнительно выполняют:

- отбор проб грунта из разнородных литологических слоев в пробуренных на участке скважинах (за исключением почвенно-растительного слоя) и проведение лабораторных измерений их радиационно-физических характеристик;
- расчетное определение плотности потока радона в соответствии с [1, п. 7.2] на участке с использованием данных о радиационно-физических характеристиках грунтов в геологическом разрезе;
- выявление аномально высоких потоков радона из грунта по результатам сопоставления измеренных и расчетных значений плотности потока радона».

II. В первый этап газогеохимических исследований предлагается включить перечень видов работ: шпуровая съемка, отбор проб грунтового воздуха и приземной атмосферы, скважинные газогеохимические исследования (с поглубинным отбором проб свободного грунтового воздуха), оценку

соответствия газогеохимических показателей участка установленным требованиям. В случае обнаружения повышенных уровней содержания газа следует проводить второй этап детальных исследований в объеме, включающем шпуровую съемку, эмиссионную съемку, отбор проб грунтового воздуха и приземной атмосферы, скважинные газогеохимические исследования (с поглубинным отбором проб свободного грунтового воздуха), оценку соответствия газогеохимических показателей участка.

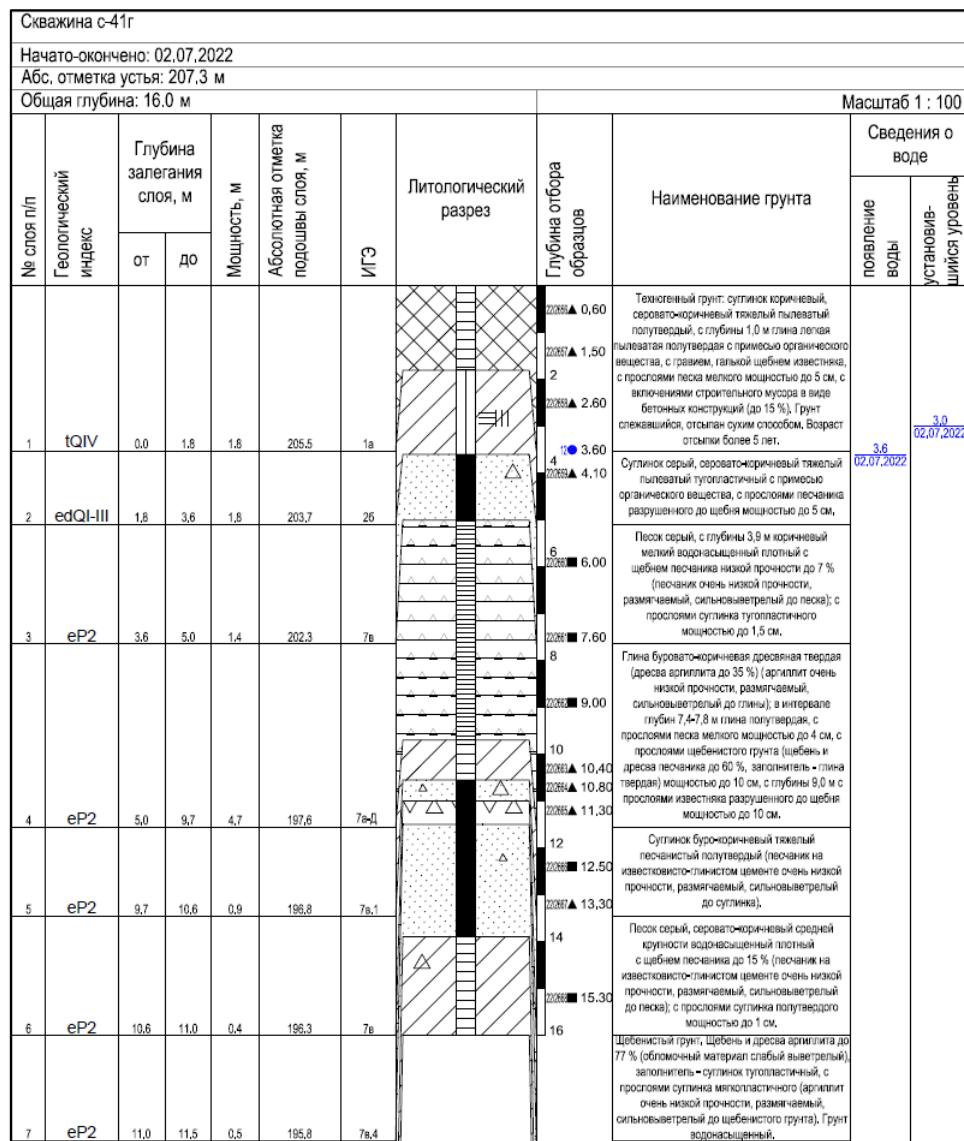


Рис. 1. Геолого-литологическая колонка скважины с техногенным (насыпным) грунтом с включением строительного мусора, мощностью более 2 м

В связи с вышеизложенным, предлагаем внесение следующих изменений в [4, п. 5.18]:

В состав газогеохимических исследований на первом этапе инженерно-экологических изысканий включить: шпуровую съемку, отбор проб грунтового воздуха и приземной атмосферы, скважинные газогеохимические исследования

(с поглубинным отбором проб свободного грунтового воздуха), оценку соответствия газогеохимических показателей участка установленным требованиям. При выполнении скважинных газогеохимических исследований, шпурковую съемку допускается не проводить.

В случае выявления газогеохимических аномалий, на втором этапе инженерно-экологических изысканий выполнять скважинные газогеохимические исследования (с отбором проб грунтового воздуха из-под накопительного колпака), расчет дебита биогаза из скважин, определение эмиссии биогаза из грунтового массива, лабораторное определение газогенерационной способности грунтов (при обосновании в программе работ). Допускается не выполнять работы второго этапа, если по результатам первого этапа работ по оценке степени газогеохимической опасности территории не выявлены газогеохимические аномалии.

В качестве примера предлагаем рассмотреть частный случай из практики производства газогеохимических исследований на одном из крупных нефтехимических предприятий Республики Татарстан.

Участок работ представлял собой промышленную территорию с потенциальными источниками загрязнения подземной геологической среды, связанными с:

- нарушением герметичности топливных резервуаров и подземных нефтепродуктопроводов, насосной станции;
- разовых проливов, не связанных с перетариванием из железнодорожных и автоцистерн нефтепродуктов;
- насыпным грунтом, являющимся источником биогаза.

Потенциально опасными участками загрязнения грунтов на территории данной промышленной зоны являются: сливные железнодорожные эстакады, наливные автоэстакады, насосные станции, трубопроводы и емкости для хранения нефтепродуктов. Данные объекты находятся на минимальном удалении около 20 м от участка проведения инженерно-экологических изысканий.

С целью изучения глубинной структуры газового поля грунтовых толщ и определения вертикальной газогеохимической зональности разреза с выделением в массиве прослоев грунтов с максимальной газогенерационной способностью, были проведены газогеохимические исследования, которые включали комплекс предполевых, полевых и камеральных работ для решения основных задач.

Выполнен предполевой анализ природных условий района исследований и материалов инженерно-геологических изысканий, в результате которого принято решение о необходимости газогеохимических исследований. По результатам анализа было подтверждено наличие на исследуемой территории насыпных грунтов мощностью до 3 м, представленных переотложенным суглинком и глиной.

В ходе полевого этапа работ проведена газогеохимическая съемка, которая включала определение эмиссии и концентраций метана, диоксида углерода,

кислорода и водорода в грунтовом воздухе с помощью поверенных газоанализаторов, газовая съемка приземной атмосферы.

По результатам газовой съемки приземной атмосферы установлено, что эмиссия биогаза в атмосферу практически не выражена, превышений предельно-допустимых концентраций метана, диоксида углерода, кислорода и водорода не обнаружено. Следующим этапом проводились скважинные измерения.

Местоположение и количество скважин (22 шт.), определено с учетом площади и конфигурации объекта, мощности насыпных грунтов, промышленного назначения территории.

Отбор грунтового воздуха из скважин осуществлялся послойно на глубину до 5 м от поверхности, на всю мощность насыпных грунтов или до установившегося уровня подземных вод с интервалом отбора в 1,0 м, что позволило судить об интенсивности эманации газа разреза.

В результате анализа характера изменений концентраций основных компонентов биогаза в грунтах с глубиной выявлено наличие опасных концентраций метана и диоксида углерода на глубине 1 м достигая опасных значений (рис. 2). При этом рост концентраций с глубиной не носит облигатного характера в каждом случае.

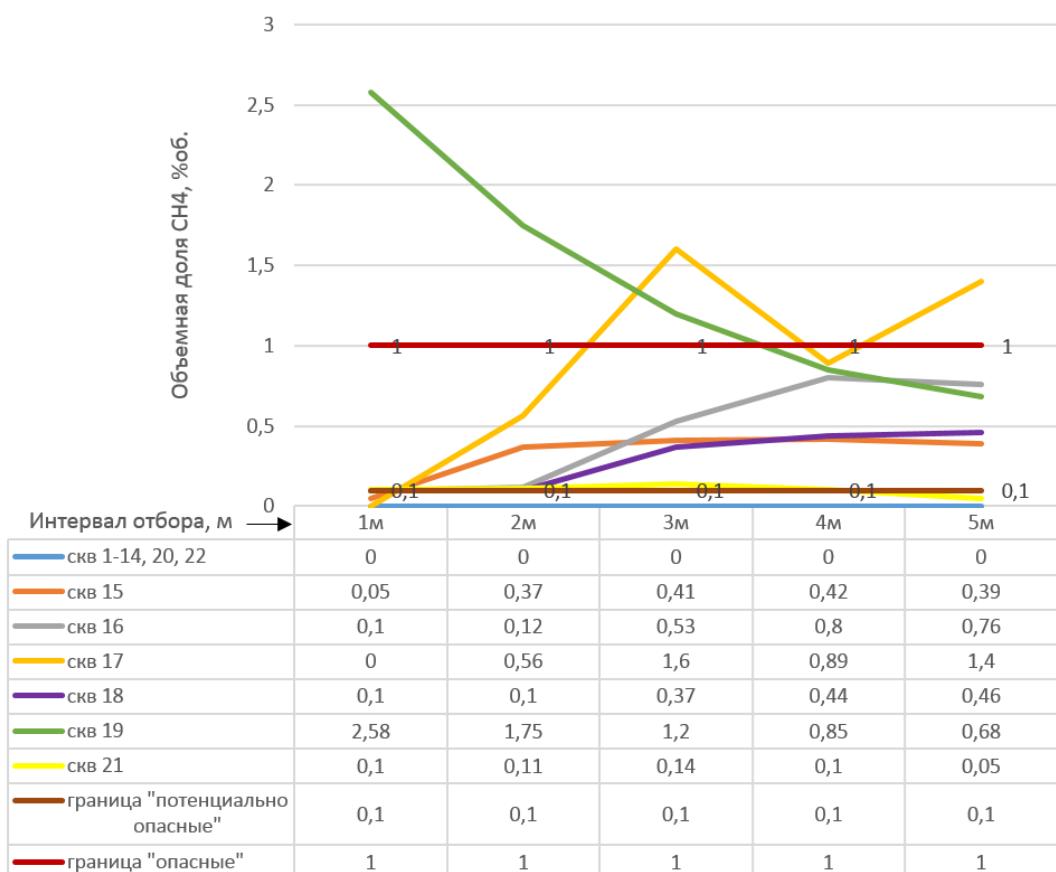


Рис. 2. Результаты измерений степени газогеохимической опасности (по CH<sub>4</sub>) грунтов в наблюдательных скважинах (Татарстан, 2022 г.)

Наиболее активная газогенерация метана выявлена в насыпных грунтах, в центральной и восточной части участка. В естественных подстилающих отложениях, в западной части площадки, концентрации исследуемых газов *не превышают* фоновых значений.

Измерение содержания метана в скважинах показывает значительные его концентрации  $> 1,0\%$  об. (скв. № 17, 19) на глубине до 5 м, что однозначно указывает на источник – газогенерирующий насыпной грунт.

С целью определения дебита биогаза из скважин, проведен повторный замер в четырех скважинах. Отбор газовых проб выполнялся послойно через каждый метр. При проведении полевых газогеохимических испытаний в скважинах сразу по окончанию бурения и первичных измерений был установлен колпак, повторные измерения выполнялись через 24 ч. По результатам выполнения измерений зависимости увеличения концентрации метана от глубины измерений и времени выдержки, на степень газогеохимической опасности грунтов не выявлено, показатели  $\text{CH}_4$  % об. не превышают  $\pm 25\%$  за 24 ч, не превышая погрешности измерений. Возможно предположить, что дополнительное увеличение времени экспозиции с учетом газогеохимических особенностей объекта не эффективно, мониторинг газогеохимического состояния на этапе проектирования и строительства *не целесообразен*.

Сводные результаты выполненных измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Степень газогеохимической опасности грунтов в скважинах

№ скважины	Средние значения объемной доли компонента, % об.				Степень газогеохимической опасности грунтов [4]
	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2$	$\text{O}_2$	
1–14, 20, 22	0,10	$< 1,0$	$< 1,0$	$> 18$	Безопасные
15	0,34	$< 1,0$	$< 0,1$	$> 18$	Потенциально опасные
16	0,46	$< 1,0$	$< 0,1$	$> 18$	Потенциально опасные
17	1,04	$< 1,0$	$< 0,1$	$> 18$	Газогеохимически опасные
18	0,29	$< 1,0$	$< 0,1$	$> 18$	Потенциально опасные
19	1,41	$< 1,0$	$< 0,1$	$> 18$	Газогеохимически опасные
21	0,11	$< 1,0$	$< 0,1$	$> 18$	Потенциально опасные

Газогеохимическое состояние грунтов оценивалось по содержанию основных компонентов биогаза в грунтовом воздухе. Критерии оценки степени газогеохимической опасности грунтов приведены в табл. 2 в соответствии с требованиями СП 502.1325800.2021 [4]).

По результатам газогеохимических исследований установлено (согласно критериям Таблицы 5.5 СП 502.325800.2021 [4]):

– степень газогеохимической опасности грунтов в обследованных скважинах № 15, 16, 18, 21 соответствует «потенциально опасной» степени газогеохимической опасности грунтов;

– степень газогеохимической опасности грунтов в обследованных скважинах № 17, 19 соответствует «газогеохимически опасной» степени грунтов;

– выполненные исследования в скважинах № 1–14, 20, 22 не выявили превышения концентраций исследуемых газов в грунтовом воздухе.

Таблица 2

Оценка степени газогеохимической опасности грунтов и возможности их использования

Степень газогеохимической опасности грунтов	Объемная доля компонента, % об.				Возможность использования грунта
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
Безопасные	< 1,0	< 1,0	< 1,0	≥ 18,0	Может использоваться без ограничения
Потенциально опасные	0,1–1,0	1,0–5,0	0,1–1,0	< 18,0	Может использоваться для инженерной подготовки территории
Газогеохимически опасные	> 1,0	> 5,0	> 1,0	< 18,0	Не может вторично использоваться для засыпки пазух котлованов и траншей
Пожаро- и взрывоопасные	≥ 5,0	–	≥ 4,0	–	При извлечении вывозится на полигон (содержание диоксида углерода не регламентируется)

На основании результатов проведенных исследований можно сделать вывод о локальном газогеохимическом загрязнении метаном грунтов территории в исследуемых скважинах. Метан является основным компонентом углеводородных газов и обладает наиболее высокой миграционной способностью, поэтому может быть принят в качестве основного параметра при мониторинговых газогеохимических наблюдениях. Газы H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> не оказывают влияние на степень газогеохимической опасности грунтов на исследуемой территории.

Несмотря на наличие повышенной концентрации газа CH<sub>4</sub>, необходимые к удалению грунты на территории инженерно-экологических изысканий по результатам газогеохимических исследований не отмечены, в соответствии с критериями, приведенными в табл. 2 (согласно критериям Таблицы 5.5 СП 502.325800.2021 [4]) при условии, если на данных участках не будут проводиться земляные работы. В качестве мероприятий по контролю за образованием биогаза, принято решение о дальнейших газогеохимических наблюдениях при проведении мониторинговых исследований на предприятии.

При извлечении газогеохимически опасных грунтов, они не могут вторично использоваться для засыпки пазух котлованов и траншей, при этом в соответствии с критериями использования указанных грунтов по Таблице 5.5 СП 502.325800.2021 [4], вывоз данных грунтов на полигон не рассматривается. Возможность использования газогеохимически опасного грунта для других

целей, исключающих засыпку пазух котлованов и траншей, также не определена. Таким образом, при проведении земляных работ и извлечении газогеохимически опасных грунтов, необходимо руководствоваться нормами в сфере обращения с отходами производства и потребления и размещать данный грунт на полигоне.

Результаты инженерно-экологических изысканий и проектная документация на объекте получили положительное экспертное заключение, подтверждена достоверность и достаточность объемов газогеохимических исследований.

*По мнению авторов, предложенная оптимизация подхода к определению радиоопасности и газогеохимической опасности грунтов участков проектирования позволит существенно сократить стоимость и сроки проведения соответствующих исследований в ходе инженерно-экологических изысканий для строительства объектов капитального строительства.*

### Список литературы

1. МУ 2.6.1.038-2015 Оценка потенциальной радиоопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий.
2. МУ 2.6.1.2398-08 Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности.
3. СП 11-102-97 Инженерно-экологические изыскания для строительства.
4. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.

**A.A. Kuzikov, O.A. Sushchenko**

NIPIGAS JSC, Krasnodar, kuzikovaa@nipigas.ru

## **ON THE ISSUE OF ORGANIZING THE APPROACH TO CONDUCTING RESEARCH OF RADON HAZARDS AND GAS GEOCHEMICAL STUDIES OF SOILS OF INDUSTRIAL FACILITIES DURING ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS FOR THE DEVELOPMENT OF DESIGN DOCUMENTATION AND PROPOSALS FOR SP 502.1325800.2021 REGULATIONS CORRECTION**

**Annotation.** Organizing and conducting studies of radon hazards and gas geochemical studies of soils in the survey area, taking into account the identification of stages of work, will allow optimizing the timing and budget of work, subject to amendments to SP 502.1325800.2021 “Engineering environmental survey for construction. General regulations for execution of work”, establishing requirements for the performance of work during engineering-ecological surveys.

**Key words:** engineering-ecological surveys; instrumental studies; radon hazard study; gas geochemical study; stages of work.

## СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

Дегтярев С.Д.<sup>1</sup>, Перевозников Б.Ф.<sup>1</sup>, Пальмов В.Г.<sup>1</sup>, Самохин М.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Институт Гипростроймост», г. Москва, degtyarev.dr@yandex.ru

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши,  
г. Москва, gidromiha@mail.ru

### ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ПРИ ПРОРЫВАХ НЕКАПИТАЛЬНЫХ ПЛОТИН В ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы определения максимальных расходов воды от прорывов некапитальных плотин при инженерно-гидрометеорологических изысканиях транспортных сооружений. Описаны история создания, современное состояние и недостатки действующей нормативной методики расчета максимального расхода от прорыва некапитальных плотин. Предложены современные методы определения ширины прорана и формула для расчета расхода прорыва с учетом принципов размерности и физических пределов рассчитываемых характеристик, направления совершенствования нормативной методики. Проведена оценка точности расчета предложенных формул для семи прорванных земляных плотин на территории Российской Федерации и Индии.

**Ключевые слова:** инженерно-гидрометеорологические изыскания; транспортные сооружения; прорыв некапитальной плотины; ширина прорана; максимальный расход от прорыва плотины; принципы размерности; физические пределы; оценка расчетных расходов по данным о прорыве плотин.

Оценка максимальных расходов при прорыве некапитальных плотин является важной частью гидрологических расчетов в процессе инженерно-гидрометеорологических изысканий при проектировании транспортных сооружений. Термин «некапитальные плотины» включен в состав п. 5.25 СП 35.13330-2011 «Мосты и трубы» [13], хотя не определен. В соответствии с мнением большинства специалистов к некапитальным плотинам можно отнести сооружения с высотой плотины до 15 м.

Большое число некапитальных плотин обычно не имеют проектной документации и собственника, за ними не осуществляется надлежащий контроль режима регулирования и уход. Поэтому они представляют потенциальную опасность для существующих и проектируемых транспортных сооружений, пересекающих водотоки как выше, так и ниже створа плотины.

Прорыв плотины при прохождении высоких расходов зависит как от состояния конструкций гидротехнических сооружений и чаши водохранилища, так и от природных гидрологических и геологических факторов. Для некапитальных плотин основными причинами их разрушения является перелив

через гребень плотины и образование «свищей» в теле плотины, а также разрушение водосбросных сооружений.

Теоретические исследования прорыва плотин начаты в конце XIX в. В 1892 г. А. Риттер дал первое решение задачи о волне прорыва без учета трения и турбулентных напряжений в потоке. Ф. Форхгеймер в 1914 г. отметил существенную роль сил трения в трансформации волны прорыва. А. Шоклич (1917 г.) провел систематические экспериментальные исследования прорыва плотин, в т.ч. и с учетом образования прорана. Способы оценки параметров волн прорыва разрабатывались в 1930–1940-х гг.: Е.К. Трифоновым (1933 г.), Б.В. Проскуряковым (1934 г.), Н.А. Ржаницыным (1936 г.), С.А. Христиановичем (1936, 1938 гг.), И.В. Егиазаровым (1938 г.), В.А. Архангельским (1947 г.). В 1940–1950 гг. опубликованы результаты американских и немецких систематических исследований в периоды военных действий с оценкой преднамеренного разрушения дамб и плотин. Эти исследования основывались на экспериментальных исследованиях процессов разрушения и теоретических решениях уравнений Сен-Венана и Буссинеска.

Новый этап исследований прорыва плотин начался с использованием численных методов и ЭВМ. В СССР последовательные и планомерные исследования выполнены академиком О.Ф. Васильевым с сотрудниками Сибирского отделения АН СССР. В современный период эти исследования выполняются с применением численных методов решения уравнений Сен-Венана и Буссинеска, на основании которых разработаны программные комплексы для расчета.

В российских научно-исследовательских центрах проведены теоретические и экспериментальные исследования прорыва земляных плотин. Наиболее важные результаты получены А.М. Прудовским [11], К.Р. Пономарчук [9], Б.В. Беликовым и Е.С. Васильевой [1]. Основное внимание в этих исследованиях уделялось процессу образования прорана (промоины, образующейся при прорыве водным потоком напорного гидротехнического сооружения, например, дамбы или земляной плотины). Применение результатов этих исследований требует достаточно большого объема информации, который трудно получить в ходе инженерно-гидрометеорологических изысканий транспортных сооружений.

Для инженерно-гидрометеорологических изысканий необходима простая, доступная и понятная методика, требующая минимум полевых и камеральных работ при проведении изысканий, соответствующая современным теоретическим представлениям о процессах прорыва плотин и обеспечивающая точность расчетов, сравнимую с морфометрическими и гидрологическими расчетами.

В транспортном строительстве используется методика, изложенная в Пособии к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91) [10]. Теоретические основы методики разработаны Л.Л. Лиштваном в 1949 г. [4]. В дальнейшем методика совершенствовалась как самим Л.Л. Лиштваном [5],

так и О.Е. Езерским [2, 3]. Полное обоснование методики дано только в статье 1949 г. Поэтому имеет смысл кратко изложить содержание этой статьи.

В основу метода расчета расхода положена формула А. Шоклича, полученная обработкой лабораторных исследований в лотках сечением  $0,96 \times 0,08$  м,  $0,60 \times 0,25$  м при ее длине 25 м, канаве сечением  $1,20 \times 1,0$  м при ее длине до 150 м.

Формула А. Шоклича имеет следующий вид:

$$Q_{\text{п}} = 0,9 \sqrt[4]{\frac{B}{b}} \cdot b \cdot H^{3/2}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{п}}$  – максимальный секундный расход в створе плотины при ее прорыве,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $B$  – длина плотины по урезу воды в верхнем бьефе, м;  $b$  – средняя длина прорыва, м;  $H$  – напор (разность отметок верхнего и нижнего бьефа в момент прорыва), м.

Подставив в формулу (1) выражение  $b = p \cdot B$  Л.Л. Лиштван преобразовал формулу к виду:

$$Q_{\text{п}} = 0,9 p^{3/4} \cdot B \cdot H^{3/2}. \quad (2)$$

Величина  $p$  определена статистическим путем по данным 15 разрушенных плотин, из которых 14 расположены за рубежом. Значение  $p = 0,8$  определено по верхней огибающей массива точек. Приняв это значение  $p$  в формуле (2) с некоторым запасом можно получить следующее уравнение

$$Q_{\text{п}} = k_{\text{пр}} \cdot B \cdot H^{3/2}, \quad (3)$$

где  $k_{\text{пр}}$  – коэффициент прорыва ( $k_{\text{пр}} = 0,75$ ).

Формула (3) с учетом того, что ширина прорана  $b_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} \cdot B$ , может быть записана в виде:

$$Q_{\text{п}} = b_{\text{пр}} \cdot H^{3/2}. \quad (4)$$

Л.Л. Лиштваном в этой статье дана формула для расчета времени опорожнения  $t_p$  при представлении гидрографа в виде прямоугольного треугольника с принятием объема прорывного паводка равным объему водохранилища перед прорывом  $W_0$

$$t_p = \frac{2W_0}{Q_{\text{п}}}. \quad (5)$$

В ней также приведена методика расчета расхода прорыва на расстоянии  $L$  от створа плотины  $Q_{\text{пп}}$ :

$$Q_{\text{пп}} = \frac{2W_0}{t_{\text{пп}} + \Delta t}. \quad (6)$$

Здесь

$$\Delta t = \frac{L}{V_2} - \frac{L}{V_1}, \quad (7)$$

где  $V_1$  – скорость движения головной части волны паводка;  $V_2$  – скорость движения в конце волны (при межени).

После подстановки (5) в (6) и с учетом того, что  $\tau = 0,5 \cdot \left( \frac{L}{V_2} - \frac{L}{V_1} \right)$ , было получено выражение для расчета  $Q_{\text{пп}}$ :

$$Q_{\text{пп}} = \frac{W_0 Q_0}{W_0 + Q_{\text{пп}} \cdot L \cdot \tau}. \quad (8)$$

Величина  $\tau$  изменяется от 1,5 для равнинных рек до 0,35 для горных рек. Методика проверена для плотины, прорванной в 1913 г. с фактическими данными по расходам на различных расстояниях от плотины. Результаты расчета показали близкие к натурным данным величины расхода.

Методика Л.Л. Лиштвана была изложена в НИМП-72 [7] с рекомендацией по коэффициенту в формуле (3)  $k_{\text{пр}} = 0,75$  для старых земляных плотин и  $k_{\text{пр}} = 0,50$  для новых земляных плотин V класса в удовлетворительных условиях. Она широко использовалась специалистами в гидрологических расчетах (Б.Ф. Перевозников [8]).

Уточненные рекомендации по применению формулы (3) даны в «Методических рекомендациях по определению расходов воды при проектировании переходов через водотоки в зоне воздействия некапитальных плотин» [6], разработанных В.В. Невским, Л.Г. Бегамом, Л.Л. Лиштваном, О.Е. Езерским. В соответствии с этим документом значение  $k_{\text{пр}}$  зависит от длины плотины и колеблется в диапазоне 0,25–0,48. Основные положения методических рекомендаций [6] даны в пособии ПМП-91 [10], являющимся в настоящее время основным нормативным техническим документом в практике изыскательских организаций транспортной отрасли.

Анализ применения этой методики показывает, что на ряде объектов она дает завышенные значения расхода прорыва, требующие принятия дополнительных строительных решений на проектируемых и эксплуатируемых сооружениях. В начале 1980-х гг. Л.Л. Лиштван и О.Е. Езерский на основании обследования нескольких сотен малых водохранилищ и прудов юго-запада Украинской и Молдавской ССР предложили понизить коэффициент до 0,05–0,12 [2, 3], но в действующий нормативный технический документ эти предложения не вошли.

В последнее время ряд специалистов [12] в ходе оценки различных методов высказали мнение о теоретической необоснованности методики Л.Л. Лиштвана, однако авторы настоящей публикации считают, что оно базируется на недостаточно глубоком знакомстве с первоначальным вариантом методики.

Основной проблемой в методике Л.Л. Лиштвана является оценка ширины прорана в линейной зависимости от длины плотины, взятой по верхней огибающей массива данных по прорванным плотинам. Анализ зависимости  $b_{\text{пр}} = f(L)$ , построенной по данным Комиссии по большим плотинам (ICOLD), материалам О.Е. Езерского и М.А. Самохина (рис. 1), показывает, что для некапитальных земляных плотин наиболее близким к реальности является значение  $k_{\text{пр}} = 0,05$ , однако разброс данных велик и возникает необходимость в поиске других методов расчета ширины прорана.

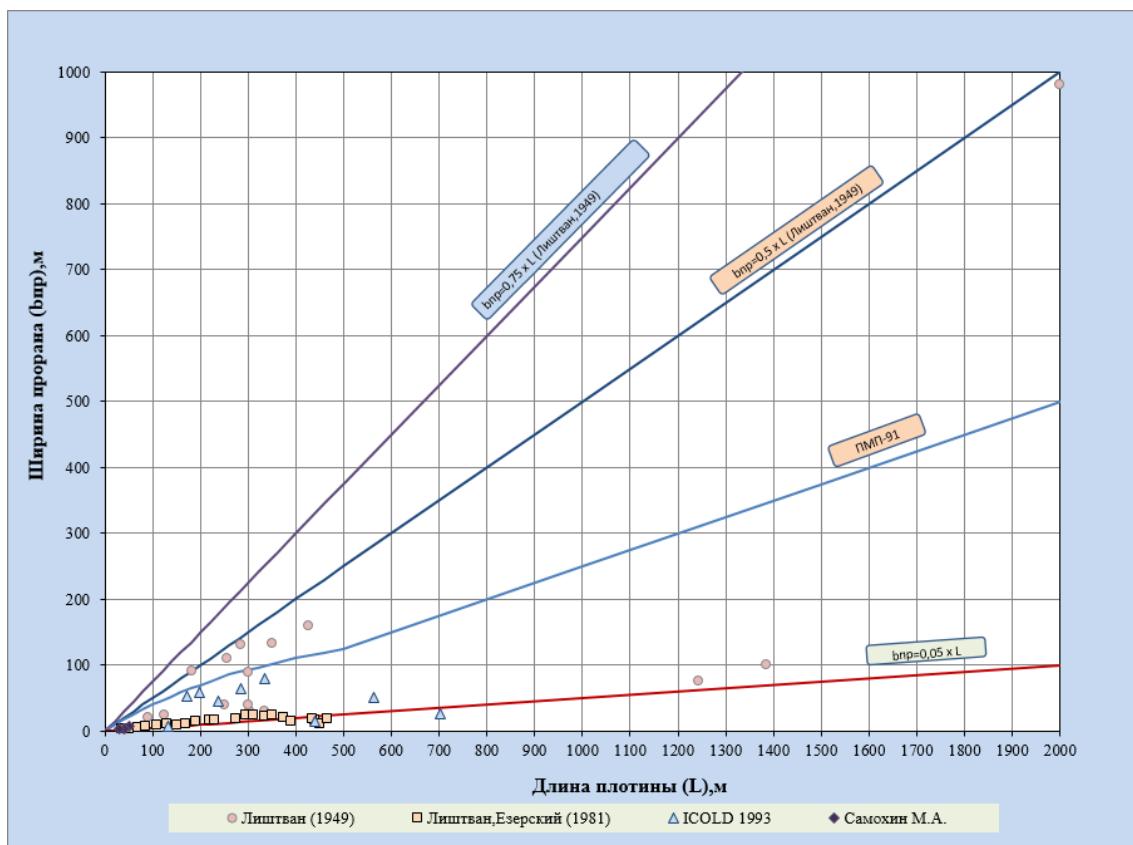


Рис. 1. Зависимость ширины прорана от длины плотины по данным Л.Л. Лиштвана, О.Е. Езерского, ICOLD, М.А. Самохина

В период 1960–1970 гг. ICOLD созданы базы данных по прорванным плотинам, позволяющие производить проверку методов расчета параметров прорыва [14, 15]. Материалы этой базы данных служат основой для проверки различных методик расчета. В силу особенностей получения этих данных в условиях техногенных катастроф они имеют значительные погрешности, но это – реальные, а не лабораторные данные.

Большой массив данных по прорывам плотин собран и проанализирован А.М. Прудовским [11]. На основе анализа этих данных предложены эмпирические и полуэмпирические методы расчета расходов и элементов прорванных плотин.

Важной задачей методики расчета является нахождение физического предела ширины прорана и расхода от прорыва в зависимости от конструкции плотины, морфометрии водохранилища, характеристик русла и поймы водотока.

Для выяснения физического предела ширины прорана построена зависимость ширины прорана  $b_{\text{пр}}$  от высоты плотины  $h_{\text{пл}}$  (рис. 2). Зависимость хорошо выражена и аппроксимируется формулой

$$b_{\text{пр}} = 3,08 \cdot h_{\text{пл}}. \quad (9)$$

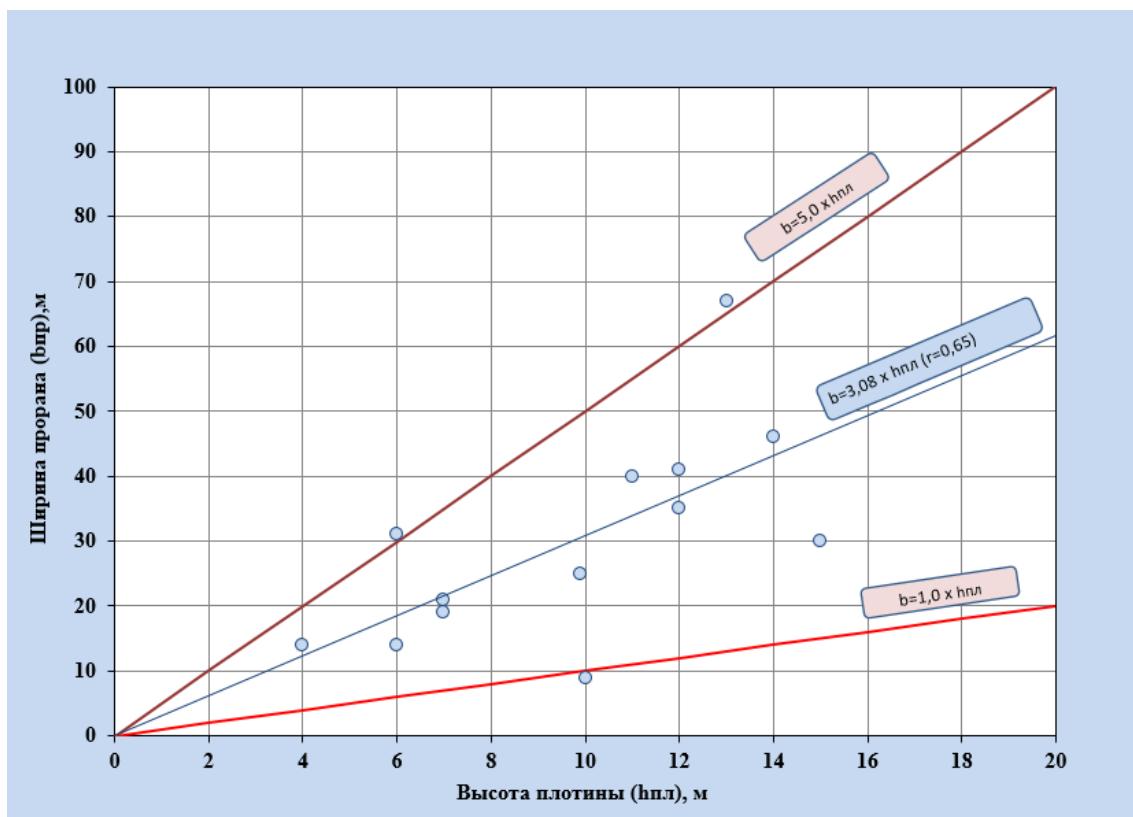


Рис. 2. Зависимость ширины прорана от высоты плотины по данным А.М. Прудовского

Однако коэффициент корреляции невысок и разброс точек достаточно большой. Важное методологическое значение имеет тот факт, что ширина прорыва физически ограничена пятикратной высотой плотины.

Основной тенденцией развития методов расчета расхода прорыва и ширины прорана как в РФ, так и за рубежом является использование безразмерных характеристик с эмпирически определяемыми константами [14, 15].

Для построения методики расчета основным является выбор наиболее важного фактора, в наибольшей степени влияющего на ширину прорыва. Анализ работ зарубежных исследователей показал, что в качестве такого фактора часто выбирается произведение объема водохранилища перед прорывом  $V_w$  на высоту плотины  $h_{пл}$  или форм-фактор прорыва  $BFF = V_w \cdot h_{пл}$ , имеющий физический смысл накопленной потенциальной энергии перед плотиной [14, 15]. Изучение расположения точек (рис. 3) показало, что основная часть их располагается в пределах полосы  $\pm 50\%$  от средней кривой, а расчетная зависимость имеет вид

$$b_{пр} = 0,3345 \cdot \sqrt[4]{V_w \cdot h_{пл}} + 8,53. \quad (10)$$

Данная зависимость удовлетворяет принципу размерностей, имеет сравнительно высокий коэффициент корреляции  $r = 0,75$  и может использоваться при оценке ширины прорана.

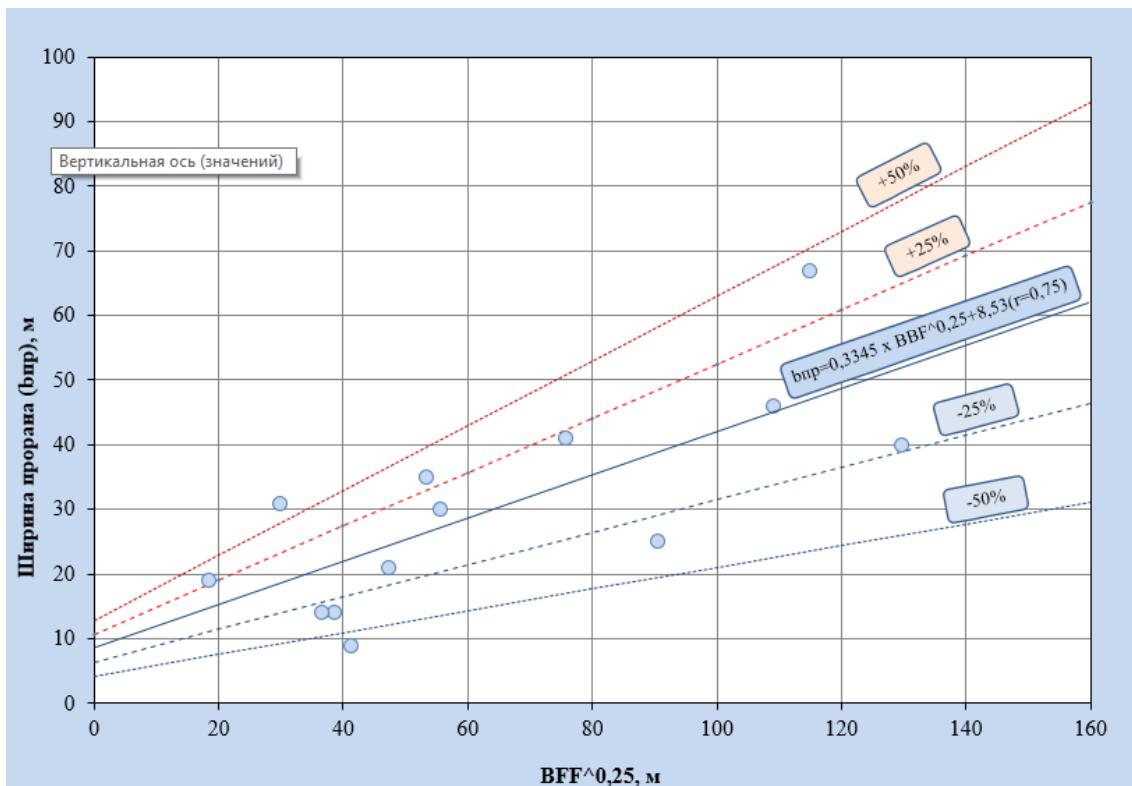


Рис. 3. Зависимость ширины прорана от форм-фактора BFF по данным А.М. Прудовского

Наряду с использованием формулы Л.Л. Лиштвана в зарубежной практике используются формулы другой структуры, полученные с использованием принципа размерностей. Авторами по данным базы данных ICOLD [15] зависимость расхода прорыва  $Q_{пр}$  от форм-фактора расхода QFF (рис. 4):

$$Q_{пр} = 0,0146 \cdot QFF, \quad (11)$$

$$QFF = h_{\text{пл}} \cdot \sqrt{g \cdot V_w}, \quad (12)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ .

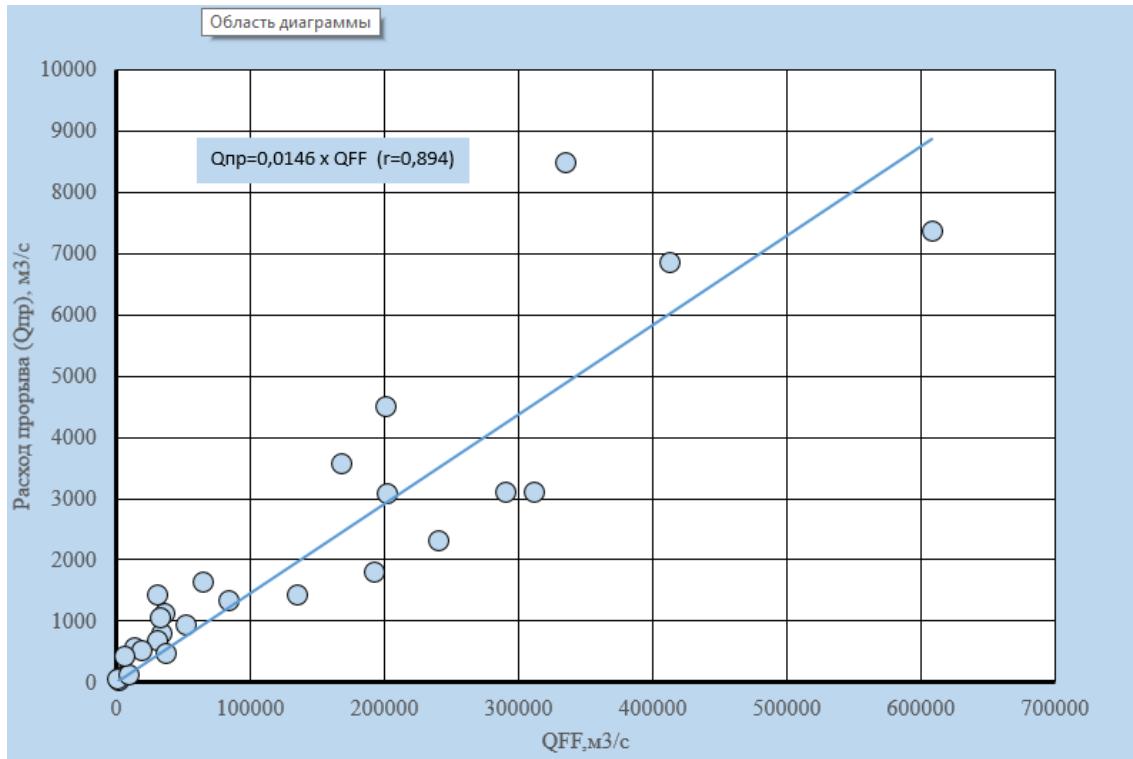


Рис. 4. Зависимость расхода прорыва  $Q_{\text{пр}}$  от форм-фактора расхода QFF по данным T.L. Wahl [15]

Уравнение (11) может использовано для расчета расхода прорыва, поскольку имеет высокий коэффициент корреляции = 0,89 и отклонение большинства точек от прямой не превышает 50%, что соответствует точности данных базы ICOLD [14, 15].

Для проверки предлагаемых методов расчета ширины прорана и расхода прорыва были проведены расчеты для трех водохранилищ на территории РФ и пяти водохранилищ Индии, данные которых не были использованы при построении эмпирических зависимостей.

Параметры водохранилищ и результаты расчета ширины прорана и расхода прорыва приведены в табл. 1 и 2.

Анализ данных табл. 1 и 2 по российским данным показывает, что в пределах изменчивости исходных данных ( $\pm 50\%$ ), наибольшую точность расчета расхода прорыва имеет метод расчета по формуле Л.Л. Лиштвана с расчетом ширины прорыва по формуле (10) и метод расчета расхода с использованием форм-фактора расхода QFF по формуле (11), которые рекомендуются при расчете расхода прорыва от земляных некапитальных плотин.

Таблица 1  
 Параметры водохранилищ

№	Наименование	Объем, млн м <sup>3</sup>	Высота плотины, м	Длина плотины, м	Ширина прорана, м	Наблюденный $Q_{\text{пр}}$ , м <sup>3</sup> /с
1	Кокпектинское	2,70	11,00	940	60	800–1200
2	Тирлянское	7,00	9,85	400	75	1500–2100
3	Киселевское	37,00	18,00	1920	70	3800–5800
4	Kodahanar	123,00	12,75	2425	–	7080
5	Ghurtijor	2,18	12,19	593	–	228
6	Jamuniya	9,21	15,40	2772	–	1800
7.	Nandgavan	2,06	18,64	735	–	4100

Таблица 2  
 Оценка ширины прорана и расхода прорыва

№	Наименование	Рассчитанная ширина прорана $b_{\text{пр}}$ , м			Рассчитанный расход прорыва, м <sup>3</sup> /с		
		$b_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} \cdot B$ $k_{\text{пр}} = 0,05$	$b_{\text{пр}}$ по формуле (9)	по формуле (10)	по формуле (4) $k_{\text{пр}} = 0,05$	по формуле (4) с $b_{\text{пр}}$ по формуле (10)	по формуле (11)
1	Кокпектинское	47	34	33	1715	1212	830
2	Тирлянское	20	30	39	618	1206	1190
3	Киселевское	96	55	62	7330	4755	5007
4	Kodahanar	121	39	75	5320	3419	6470
5	Ghurtijor	30	38	32	1260	1385	820
6	Jamuniya	139	47	45	8380	2722	2140
7	Nandgavan	37	57	35	2960	2896	1220

В соответствии с проведенными исследованиями предлагается следующая методика расчета расхода от прорыва некапитальных плотин:

1. Расчет форм-фактора прорыва BFF по формуле:

$$BFF = V_w \cdot h_{\text{пл}} ; \quad (13)$$

2. Определение ширины прорана по формуле:

$$b_{\text{пр}} = 0,3345 \cdot \sqrt[4]{BFF} + 8,53; \quad (14)$$

3. Определение расхода от прорыва  $Q_{\text{пр-1}}$  по модифицированной формуле (4) Л.Л. Лиштвана:

$$Q_{\text{пр-1}} = b_{\text{пр}} \cdot H^{3/2}; \quad (15)$$

4. Расчет форм-фактор расхода ( $QFF$ ) по формуле:

$$QFF = h_{\text{пл}} \cdot \sqrt{g \cdot V_w}; \quad (16)$$

5. Определение расхода от прорыва  $Q_{\text{пр}_2}$  по формуле:

$$Q_{\text{пр}_2} = 0,0146 \cdot QFF; \quad (17)$$

6. Окончательная величина расхода от прорыва плотины  $Q_{\text{пр}}$  определяется как максимальное значение из расходов  $Q_{\text{пр}_1}$  и  $Q_{\text{пр}_2}$ :

$$Q_{\text{пр}} = \max (Q_{\text{пр}_1}, Q_{\text{пр}_2}). \quad (18)$$

Оценку объема водохранилища  $V_w$  и величины трансформации расхода на транзитном участке русла на настоящем этапе развития методики предлагается выполнять по методике ПМП-91 [10].

Использование методик расчета и математических моделей должно проверяться сравнением с фактическими данными по прорывам плотин, поэтому наряду с задачей определения расчетного расхода от прорыва необходимо создание национальной базы данных по прорванным плотинам как капитального, так и не капитального типа.

### Список литературы

1. Васильева Е.С., Беликов Б.В. Численное моделирование каскадной гидродинамической аварии на Верхнеуральской и Магнитогорской плотинах // Гидротехническое строительство. 2023. № 8. С. 36–44.
2. Езерский О.Е. О расчете расхода прорыва при разрушении низконапорных плотин // Транспортное строительство. 1975. № 3. С. 49–50.
3. Езерский О.Е., Лиштван Л.Л. Максимальный расход прорыва и его трансформация в транзитном русле // Труды УкрНИГМИ. 1980. Вып. 181. С. 24–33.
4. Лиштван Л.Л. К вопросу о проектировании мостовых переходов в районе водохранилищ // Техника железных дорог. 1949. № 7. С. 14–16.
5. Лиштван Л.Л. Об учете распластывания паводочной волны при проектировании малых мостов и труб // Транспортное строительство. 1960. № 4. С. 43–45.
6. Методические рекомендации по определению расходов воды при проектировании переходов через водотоки в зоне воздействия некапитальных плотин. М.: ВНИИТС, 1981. 18 с.

7. Наставление по изысканиям и проектированию автодорожных и автомобильных мостовых переходов через водотоки (НИМП-72). М.: Транспорт, 1972. С. 141–144.
8. Перевозников Б.Ф. Расчеты максимального стока при проектировании дорожных сооружений. М.: Транспорт, 1975. С. 266–267.
9. Пономарчук К.Р. Оценка параметров развития прорана при разрушении грунтовой плотины // Природообустройство. 2011. № 3. С. 77–82.
10. Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). М.: Трансстрой, 1992. С. 184–188.
11. Прудовский А.М. Образование прорана при прорыве земляной плотины // Научно-технический производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений». М., 1998. Вып. 2–3. С. 67–79.
12. Расчет морфометрических характеристик прорана и максимальных расходов при прорывах некапитальных плотин / Т.А. Виноградова, М.А. Макушин, М.А. Виноградов, Е.А. Парфенов, М.М. Кадацкая, С.И. Сазонова // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 2. С. 280–295.
13. СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84».
14. Froehlich D.C. Embankment dam breach parameters and their uncertainties // Journal of Hydraulic Engineering. 2008. Vol. 134, No. 12, P. 1708–1720.
15. Wahl T.L. Prediction of embankment dam breach parameters: a literature review and needs assessment. Dam safety research Report DSO-98-004, 1998. 61 p.

**S.D. Degtyarev<sup>1</sup>, B.F. Perevoznikov<sup>1</sup>, V.G. Palmov<sup>1</sup>, M.A. Samokhin<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Institute Giprostroimost OJSC, Moscow, degtyarev.dr@yandex.ru

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, gidromiha@mail.ru

## **ASSESSMENT OF MAXIMUM WATER DISCHARGES FROM NON-CAPITAL DAM BREAKS IN ENGINEERING- HYDROMETEOROLOGICAL SURVEYS OF TRANSPORT STRUCTURES**

**Abstract.** The issues of determining the maximum water discharge from non-capital dam breaks during engineering hydrometeorological surveys of transport structures are considered. The history of creation, the present state and disadvantages of the current regulatory methodology for calculating the maximum water discharge from non-capital dam breaks are described. Modern methods for determining the width of closing gap and a formula for calculating the break discharge are proposed, taking into account the principles of dimensionality and physical limits of the calculated characteristics, directions for improving the normative methodology. The accuracy of calculation of the proposed formulas for seven ruptured earthen dams on the territory of the Russian Federation and India has been assessed.

**Key words:** engineering-hydrometeorological surveys; transport structures; non-capital dam break; the width of closing gap; the maximum discharge from dam break; the principles of dimensionality; physical limits; assessment of calculated costs based on dam break data.

**Мальнева И.В.<sup>1</sup>, Докукин М.Д.<sup>1</sup>, Анаев М.А.<sup>2</sup>, Акаев А.Р.<sup>1</sup>, Хаджиев М.М.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, malnir@mail.ru

<sup>2</sup>Главное управление МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике, г. Нальчик, amaga0773@mail.ru

## **УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ В 2022 И 2023 ГГ.**

**Аннотация.** Представлены материалы о проявлении селей и других склоновых процессов в Кабардино-Балкарской Республике в 2022 и 2023 гг., а также в 2000 и 2017 гг. Эти годы отличались аномально высокой температурой воздуха летом на Кавказе, и в Северном полушарии Земли в целом. Отмечено, что особенности развития наиболее опасных геологических процессов (оползней, селей и др.) обусловлены глобальными климатическими изменениями. Для оценки климатических изменений и крупнейших катастроф использована типизация циркуляции атмосферы Северного полушария Земли, разработанная под руководством Б.Л. Дзердзеевского. Материалы типизации с 1899 по 2018 гг. размещены в сети Интернет в открытом доступе на сайте [www.atmospheric-circulation.ru](http://www.atmospheric-circulation.ru). Учтены изменения солнечной активности и особенности космической погоды в последние годы, которые приближаются к максимуму 25 цикла солнечной активности.

**Ключевые слова:** сели; оползни; солнечная активность; космическая погода; атмосферная циркуляция; элементарный циркуляционный механизм.

2022 и 2023 гг. на Северном полушарии отличаются обилием природных катастроф в первую очередь погодных аномалий – волны экстремальной жары, разрушительные лесные пожары... Следует отметить, что лето 2023 г. было не просто жарким, а чрезвычайно жарким, особенно в Западной Европе, а также на всей территории Северного Кавказа. В России прошедший август оказался самым теплым в истории регулярных метеонаблюдений, т.е. с 1891 г.

В связи с глобальным изменением климата в последнее время наблюдается активизация природных катастроф, связанных с проявлением опасных склоновых процессов, среди которых выделяются сели и парагенетически связанные с ними оползни, эрозия и др. К числу регионов с наиболее высокой активностью селевого процесса на территории России относится Северный Кавказ, где средние месячные значения температуры воздуха и количества осадков в июле и августе 2022 и 2023 гг. значительно отличаются от средних многолетних значений.

Наиболее благополучным с точки зрения активизации селей и других склоновых процессов летом 2023 г. была территория Кабардино-Балкарской Республики. Для бассейнов наиболее крупных рек Центрального Кавказа – Баксана, Чегема, Черека Балкарского самая сильная активизация селей в XXI в. наблюдалась в ущелье р. Герхожансу (бассейн р. Баксан) в 2000 г. В июле 2000 г. также была экстремально высокая средняя месячная температура воздуха (15,6°C). Это самая высокая средняя месячная температура за весь период наблюдений по данным гидрометеостанции (ГМС) «Терскол» при незначительном количестве осадков в июле [6]. Наиболее сильная активизация

зарегистрирована 1 сентября 2017 г. в результате прорыва оз. Башкара по долине р. Адыл-Су, где произошел сход селевого потока объемом около 800 тыс. м<sup>3</sup> и наносоводный сель по р. Баксан [10, 11]. В августе, предшествующем прохождению селевого потока, средняя месячная температура воздуха была значительно выше нормы (14,1°C), что подготовило катастрофическую активизацию 1 сентября при экстремальном количестве осадков в ночь с 31 августа на 1 сентября.

**Следует отметить, что в 2022 и 2023 гг. катастрофических проявлений селей в Кабардино-Балкарской Республике не было.** За 2022 и 2023 гг. выделяются высокие средние месячные значения средней суточной температуры воздуха и количество осадков, или не превышающее средние многолетние значения, или ниже нормы.

В конце июня 2022 г. после ливней сошли небольшие сели в Черекском ущелье (всего 1–3 тыс. м<sup>3</sup>). В ущелье р. Черек Безенгийский вечером 13 августа при отсутствии осадков сошел сель по р. Мижириги. Объем отложений на участке около альпинистского лагеря и в устье р. Мижириги составил около 200 тыс. м<sup>3</sup>. На рис. 1 показана зона отложений селя по р. Мижириги около альпинистского лагеря «Безенги».

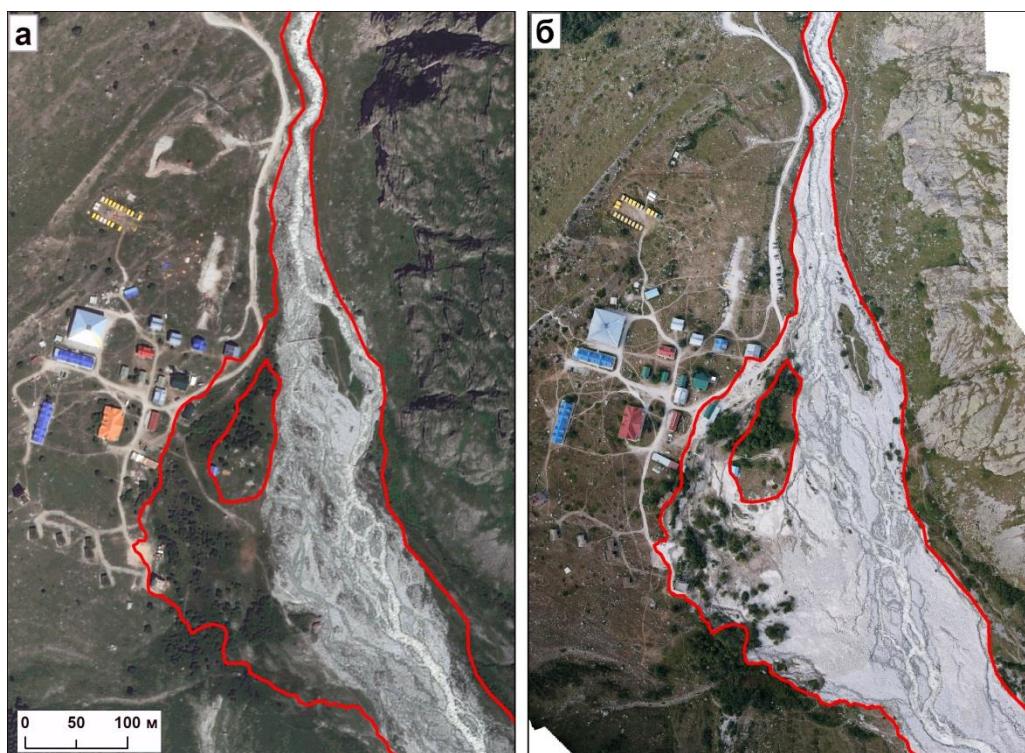


Рис. 1. Отложения селя по р. Мижириги 13.08.2022 около альплагеря «Безенги»:  
а – космоснимок с сервиса Bing Maps, б – фрагмент ортофотоплана 28.08.2022

Подготовка селевого процесса происходила длительное время и связана была с накоплением воды в массиве береговой морены от водотока, берущего начало с ледника, и разжижением моренного грунта. В Баксанском ущелье

прошел сель по р. Герхожансу 5 августа 2022 г. За 4,5 ч до селя приледниковая зона в верховьях р. Каяартысу была практически свободна от облаков, что может служить основанием для предположения о незначительной роли атмосферных осадков в формировании селя. Необычным было сель в урочище Джилы-Су 4 октября 2022 г. Можно сделать вывод, что крупные сели 2022 г. формировались в результате длительных процессов обводнения моренных масс, а в случае селя на р. Герхожансу – в результате накопления талых вод под ледником и их прорыва. Выпадение осадков не играло главной роли в формировании селей [8].

В 2023 г. проявления селей на наиболее селеопасных реках не отмечалось. Был обвал с ледника на склоне г. Дых-тау 12 августа объемом около 1 млн м<sup>3</sup>. Только 18 августа прошли селевые потоки по левым притокам р. Чегем выше с. Булунгу, а 28 мая и 1 июня прошли наносоводные сели по р. Нальчик. На рис. 2 показаны следы прохождения селя по левому притоку р. Чегем.



Рис. 2. Следы прохождения селя по левому притоку р. Чегем. Фото А.Р. Акаева

*Авторы много лет занимались исследованием условий формирования селей в наиболее селеопасных бассейнах, в т.ч. и условиями формирования катастрофических селевых потоков в 2000 и 2017 гг. При этом условия во многом были похожи, но в 2022 и 2023 гг. катастрофических проявлений селей не наблюдалось. Для оценки опасности подобных катастроф в будущем необходимо определить причину низкой и высокой активности селей.*

Как отмечено выше, в июле 2000 г. наблюдалась экстремально высокая средняя месячная температура воздуха – самая высокая средняя месячная

температура за весь период наблюдений. Максимальные средние суточные значения по данным ГМС «Терскол» в период формирования и прохождения селей превышали 28°C. По-видимому, на высоте 3500 м максимальная суточная температура была около 20°C, т.к. по утверждению многих исследователей разница между значениями этого показателя на высоте 1500 и 3500 м составляет, примерно, 10°C. Наиболее высокой она была в период с 14 по 23 июля [6].

Характерной особенностью синоптических условий на Северном Кавказе в теплый период 2000 г. было то, что с 14 мая по 4 августа этот район почти непрерывно находился под воздействием антициклона, пополняемого воздушными массами с севера в тылу проходивших севернее южных циклонов. С таким положением связаны и экстремально высокие температуры воздуха в отдельные дни, и сравнительно небольшое количество осадков. Катастрофический сель 2000 г. на р. Герхожансу был подготовлен продолжительным таянием ледника при ясной погоде и достаточно высокой температуре воздуха. Решающим было накопление талой воды в подледниковых условиях и прорывной водный импульс. На рис. 3 показана зона аккумуляции селей р. Герхожансу (1999, 2000, 2011, 2017 и 2022 гг.) в г. Тырныаузе и образования подпрудных озер (2000 и 2017 гг.).



Рис. 3. Зона аккумуляции селей р. Герхожансу и формирования подпрудных озер на р. Баксан на космоснимках Landsat (1999–2011 гг.) и Sentinel-2 (2017 и 2022 гг.).

Источник: <https://apps.sentinel-hub.com/ eo-browser>

В 2017 г. прохождение селей было подготовлено аномальными погодными условиями в июле и августе. Так в июле 12 дней средняя суточная температура воздуха была выше 15°C (по данным ГМС «Терскол»), что является пороговым критическим значением при формировании селей. В августе с начала месяца средняя суточная температура не опускалась ниже 15°C, а доходила почти до 20°C, что обусловлено влиянием мощного антициклона на юге Европейской России. Осадков в августе практически не было. К 11 августа снеговая линия проходила на высоте более 3800 м. Все это повлияло на состояние моренно-ледникового комплекса в верховьях р. Каяартысу. При этом высокие температуры воздуха создают условия для формирования больших объемов талых ледниковых вод, которые могут накапливаться внутри ледника и затем прорываться в виде гляциальных паводков. Данные условия можно сравнить с июлем 2000 г.

*После длительного периода аномально жаркой погоды над высокогорными районами Центрального Кавказа установился атмосферный фронт, с которым были связаны локальные ливни.* Причиной прорыва оз. Башкара и катастрофического селя в Баксанском ущелье Кабардино-Балкарской Республики стал всего один ливень. Такого сильного ливня в этом районе не было более четверти века, а его вероятность по данным многолетних наблюдений – менее чем раз в сто лет.

Характер погоды в июле и августе в 2022 и 2023 гг. имеет много общего с годами проявления катастрофических селей, лето было не просто жарким, а чрезвычайно жарким (табл. 1).

Таблица 1

Среднемесячные температуры воздуха  $T_{ср.}$ , °C и количество осадков  $Q$ , мм в годы проявления катастрофических селевых потоков и в 2022 и 2023 гг. по отношению к среднему многолетнему значению

Год	Месяцы					
	июнь		июль		август	
	$T_{ср.}$ , °C	$Q$ , мм	$T_{ср.}$ , °C	$Q$ , мм	$T_{ср.}$ , °C	$Q$ , мм
Среднее многолетнее значение	<b>9,9</b>	<b>93,0</b>	<b>12,5</b>	<b>100,0</b>	<b>12,1</b>	<b>91,0</b>
2000	<b>9,8</b>	98,7	<b>15,6</b>	58,6	<b>12,2</b>	105,9
2017	<b>10,6</b>	80,9	<b>14,1</b>	67,1	<b>14,1</b>	83,4
2022	<b>10,8</b>	107,2	<b>13,11</b>	87,8	<b>14,8</b>	42,7
2023	<b>10,9</b>	83,5	<b>12,8</b>	71,5	<b>14,9</b>	98,7

*Характер погоды во все указанные в таблице годы был обусловлен соответствующим характером атмосферной циркуляции. Для изучения режима ряда природных процессов, в частности, оползней, селей и др., использовалась типизация макроциркуляционных процессов, разработанная Б.Л. Дзердзевским и др. [3, 4]. К настоящему времени календарь последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ)*

составлен с 1899 по 2019 гг. как в публикациях, так и на сайте <https://atmospheric-circulation.ru/>.

**Годы максимального развития в северном полушарии меридиональной северной и южной групп циркуляции неоднократно были годами природных катастроф.** Росту их повторяемости способствует меняющийся характер циркуляции атмосферы: увеличение повторяемости блокирующих процессов (арктических вторжений, заканчивающихся формированием обширного стационарного антициклона) и выходов южных циклонов.

В сложившейся ситуации, когда высокогорные районы бассейнов рек Кабардино-Балкарской Республики совершенно не охвачены метеорологическими наблюдениями, приобретают особое значение количественные показатели атмосферной циркуляции, с которыми, как указывалось выше, тесно связаны проявления селей. По данным календаря ЭЦМ можно подсчитать число дней с каждым ЭЦМ за месяц, за год и т.д. На основании анализа данных селевой деятельности, приведенных выше, можно сказать, что ЭЦМ являются моделью погоды для конкретного района [3].

Наиболее опасным в 2000, 2017 гг. был ЭЦМ 13л. В последние годы отмечается значительный рост продолжительности меридиональной южной циркуляции, в т.ч. наиболее процессоопасного ЭЦМ 13л. При ЭЦМ 13л, отмечается четыре выхода южных циклонов в Северном полушарии, из них три – на территории России, один из которых – на Кавказе. За короткое время прохождения циклона (1–2 дня) могут выпадать большие суммы осадков, имеющие обеспеченность менее 1%, часто в виде интенсивных ливней. Это приводит к активизации оползневого, селевого, эрозионного и др. процессов. Как правило, с ЭЦМ 13л связано повышение температуры воздуха. Летом при ЭЦМ 13л уменьшается количество осадков, но повышается температура воздуха. На рис. 4 представлена продолжительность ЭЦМ 13л и 12а в настоящее время и по прогнозу в ближайшие годы [4, 5].

При сопоставлении условий формирования селей и других склоновых процессов целесообразно рассматривать их проявление и факторы, их обуславливающие, **как сложную открытую многокомпонентную систему**, в которой проявление отдельных процессов является результатом действия всей системы [12]. В ходе развития системы осуществляется энергомассообмен между отдельными компонентами природы и привнос энергии и вещества извне. Главным звеном в этой цепи причинно-следственных связей является энергия, поступающая от Солнца.

На характеристику космической погоды авторы обратили внимание при ежегодных исследованиях условий формирования селей в Приэльбрусье (после катастрофического селя 2000 г.) [1] и в течение 2001–2023 гг. вели наблюдения с целью установления связи между проявлением селей и показателями космической погоды [8].

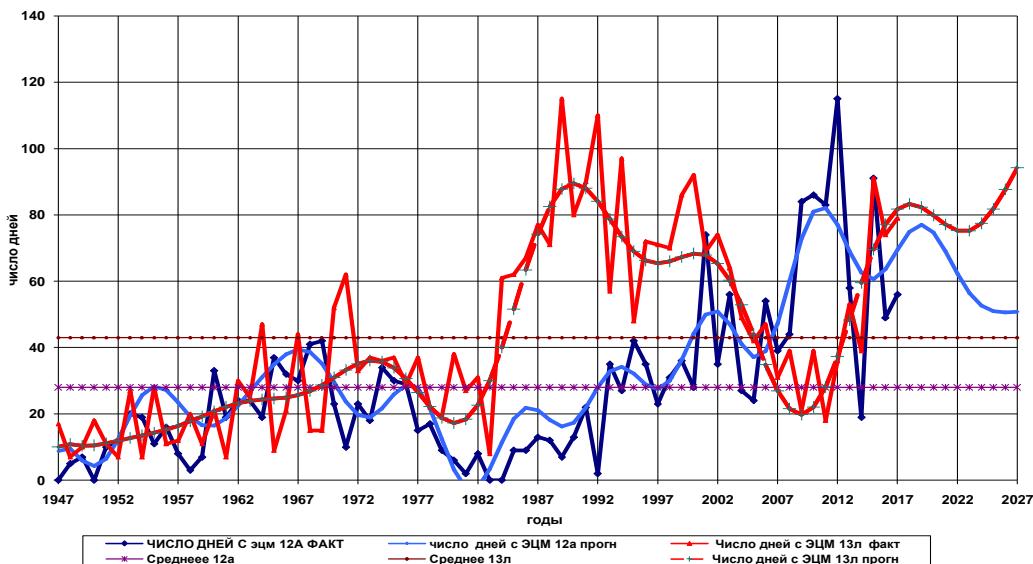


Рис. 4. Продолжительность ЭЦМ 13л и 12а в настоящее время и по прогнозу в ближайшие годы

Основной агент, посредством которого активные процессы на Солнце влияют на состояние околоземного пространства, геомагнитосферы и приповерхностной области Земли – это солнечный ветер. Посредством солнечного ветра происходит перенос импульса и энергии от Солнца к Земле и другим планетам. Было отмечено, что влияние космической погоды может проявить себя только тогда, когда для него будут подготовлены земные природные условия, в значительной степени определяющие активность опасных природных процессов [1].

Основные параметры плазмы геоэффективного солнечного ветра вблизи орбиты Земли – скорость плазмы солнечного ветра, измеряемая в километрах в секунду (км/с), и концентрация (плотность) протонов в плазме солнечного ветра, измеряемая количеством частиц в кубическом сантиметре (ед./см<sup>3</sup>). Наибольшие амплитуды всплесков значений скорости солнечного ветра, доходящие до 1800–2300 км/с и протонов до 10–50 ед./см<sup>3</sup> и более, наблюдаются тогда, когда он истекает *из коронарных дыр* – открытых магнитных конфигураций с расходимостью магнитных силовых линий [7].

При исследованиях селей в период их формирования и прохождения, в первую очередь, были использованы временные ряды количественных значений скорости солнечного ветра, полученные измерительными приборами в ближней зоне к Земле, начиная с орбит космических аппаратов SOHO, ACE, NOAA POES. Фактические данные по солнечному ветру помещены в сети Интернет в открытом доступе (например, на сайтах <http://www.swpc.noaa.gov/products>, <http://spaceweather.com/>, [www.thesis.xras.ru](http://www.thesis.xras.ru)) [13, 14].

На основании имеющихся данных были собраны сведения о наиболее значительных проявлениях оползней и селей на территории России и стран СНГ в XXI в. и сопоставлены с некоторыми параметрами солнечного ветра. Некоторые из этих материалов представлены в табл. 2 [5].

Таблица 2  
Показатели параметров солнечного ветра при наиболее значительных природных  
катастрофах в России и странах СНГ в XXI в.

Катастрофические проявления опасных экзогенных геологических процессов (даты проявления процессов)	Скорость солнечного ветра, км/с	Средняя часовая плотность протонов, ед./см <sup>3</sup>
Многофазный селевой поток по р. Герхожансу (18–25.07.2000)	600–1000 (13–18.07.2000)	14–22 (13.07.2000)
Катастрофические наводнения, сели, оползни на Северном Кавказе (лето 2002 г.)	700–843 (19–31.07.2002)	11–19 (Июнь 2002 г.)
Сход ледника Колка, (20.09.2002)	700 (18–19.09.2002)	–
Сели на Северном Кавказе по р. Герхожансу (14–15.08.2017)	638	–
Прорыв оз. Башкара и катастрофический сель по долине р. Адылсу (Северный Кавказ) (в ночь с 31 августа на 1 сентября 2017 г.)	594–670	–

Указанные катастрофы – это результат *прорывных инжеекций в приповерхностную область Земли сгустков отсодинившихся в геомагнитосферу компонент геоэффективного солнечного ветра* [1].

В работах [5, 9] было отмечено, что опасными периодами для развития процессов являются переломные моменты в ходе солнечной активности.

В декабре 2019 г. закончился 24-й солнечный цикл и начался новый 25-й цикл [2]. Считалось, что многолетние данные по солнечной активности (выраженной в числах Вольфа), наблюдаемой с 1749 г., позволяют экстраполировать ее изменения, а, следовательно, и тенденцию связанных с ней природных явлений, в т.ч. и опасных экзогенных геологических процессов на много лет вперед [5, 12].

Наступивший 25-й цикл по новым предположениям специалистов будет выше, чем 24-й цикл и, скорее всего, похож на 23-й цикл, который был очень опасным с точки зрения активности селей. Через несколько лет после минимума предыдущего цикла в 1997 г. в Приэльбрусье произошла активизация селей. Если считать от 2019 г. в 25-м цикле, подобная активизация была возможна и в 2022 г., но вероятнее в 2023–2024 гг., когда по новым представлениям специалистов близко к возможному максимуму 25-го цикла [4].

*Таким образом, период 2022–2025 гг. – это период возможной катастрофической активизации селей в наиболее опасных бассейнах Северного Кавказа и парагенетически связанных с ними оползневых и эрозионных процессов. В 2021 г. характер активности Солнца начал меняться. Хотя солнечная активность оставалась очень высокой, различные события в эти годы чаще происходят на обратной стороне Солнца и не оказывают очень большого влияния на развитие процессов на Земле. Хотя это влияние в той или иной степени проявляется. В 2022 и 2023 гг. на стороне Солнца, обращенной к Земле, количество корональных дыр существенно уменьшилось.*

*По-видимому, в ближайшие годы увеличение активности селей и других опасных природных процессов почти неизбежно, поскольку молодой солнечный 25-й цикл начнет свое проявление в предстоящие годы (speaceweather.com) [13, 14] (рис. 5).*

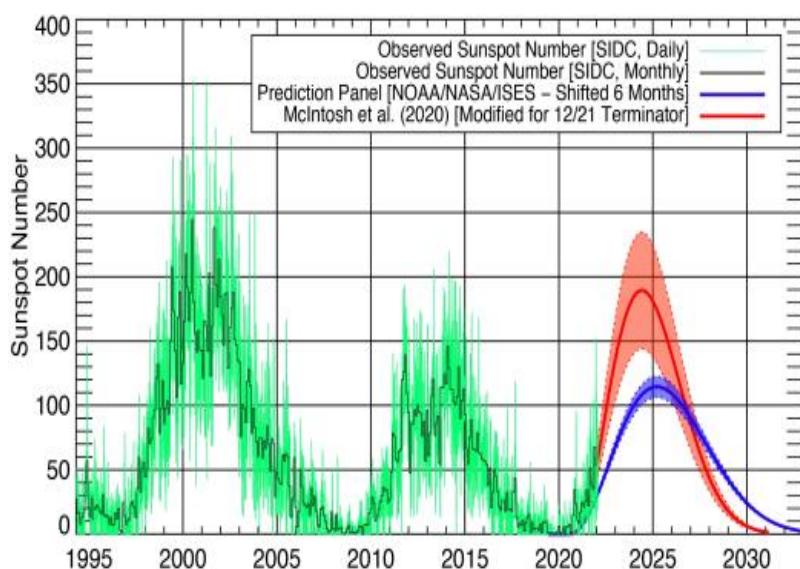


Рис. 5. Прогноз для 25 солнечного цикла. Обозначения: синий цвет – официальный прогноз слабого цикла; красный цвет – уточненный авторский прогноз

Уровень солнечной активности в июне–июле 2023 г. достиг максимальных значений за последние 20 лет. Следует отметить, что рост активности Солнца пока не привел к ощутимому воздействию на Землю. По-настоящему сильных взрывов на Солнце в этом цикле пока не было, но они возможны в недалеком будущем.

### Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы. Количество экстремумов как температуры воздуха, так и осадков, в XXI в. продолжает расти. Отрицательные экстремумы осадков в сочетании с

положительными экстремумами температуры воздуха приводят к природным пожарам, положительные экстремумы осадков – к катастрофическим наводнениям. Росту повторяемости и тех, и других способствует меняющийся характер циркуляции атмосферы: увеличение повторяемости блокирующих процессов (арктических вторжений, заканчивающихся формированием обширного стационарного антициклона) и выходов южных циклонов.

На основании всех рассмотренных материалов следует дать предварительную оценку активности наиболее опасных процессов на Северном Кавказе – селей и оползней, парагенетически связанных между собой, в ближайшие годы. Вероятность катастрофической активизации указанных процессов будет достаточно высокой. Пока не изменится существующая направленность активности Солнца, тенденцию развития опасных природных процессов на конкретной территории определить очень трудно.

### Список литературы

1. Гонсировский Д.Г. О возможном влиянии плазмы солнечных вспышек на возникновение гляциальных селевых потоков на Земле // Жизнь Земли. 2017. Т. 39. № 2. С. 147–154.
2. Ишков В.Н. Космическая погода в 25 солнечном цикле и его особенности развития // Сборник тезисов докладов семнадцатой конференции «Физика плазмы в солнечной системе». М.: Изд-во ИКИ РАН, 2022. С. 71.
3. Кононова Н.К. Приложение 1. Календарь последовательной смены ЭЦМ за 1899–2008 гг. // Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому / Н.К. Кононова; отв. ред. А.Б. Шмакин. М.: Воентехниздат, 2009. С. 219–328.
4. Кононова Н.К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 127–156.
5. Мальнева И.В. Прогнозирование современных геологических процессов на территории России и стран СНГ в начале XXI века // Геоэкология. 2019. Вып. 1. С. 87–98.
6. Мальнева И.В., Кононова Н.К. Метеорологические условия формирования катастрофических селей в июле 2000 года в бассейне р. Герхожан-су и прогноз селевой опасности // Научно-технический информационный сборник «Геологическое изучение и использование недр». Вып. 6. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. С. 75–81.
7. Мальнева И.В., Черкесов А.А. Особенности космической погоды и метеорологических условий в Приэльбрусье летом 2019 года и проявление опасных природных процессов // Сборник тезисов докладов пятнадцатой конференции «Физика плазмы в солнечной системе». М.: Изд-во ИКИ РАН, 2020. С. 234–297.

8. Оценка проявлений опасных природных процессов на Северном Кавказе в 2002 и 2022 гг. / И.В. Мальнева, М.Д. Докукин, Р.Х. Калов, А.Р. Акаев, М.А. Анаев // Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: ООО «Геомаркетинг», 2022. С. 214–221.
9. Прогноз экзогенных геологических процессов на черноморском побережье СССР / Под ред. А.И. Шеко. М.: Недра, 1979. 239 с.
10. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года / С.С. Черноморец, Д.А. Петраков, А.А. Алейников, М.Ю. Беккиев, К.С. Висхаджиева, М.Д. Докукин, Р.Х. Калов, В.М. Кидяева, В.В. Крыленко, И.В. Крыленко, И.Н. Крыленко, Е.П. Рец, Е.А. Савернюк, А.М. Смирнов // Криосфера Земли. 2018. Т. XX. № 2. С. 70–80.
11. Селевые потоки 14–15 августа 2017 г. в бассейне р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ): условия и причины формирования, динамика, последствия / М.Д. Докукин, М.Ю. Беккиев, Р.Х. Калов, М.М. Хаджиев, Е.М. Богаченко, Е.А. Савернюк // ГеоРиск. 2018. Т. XII. № 3. С. 82–94.
12. Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. М.: Недра, 1980. 296 с.
13. Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца. ФИАН. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tesis.lebedev.ru/> (дата обращения: 20.10.2023).
14. Spaceweather.com [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://spaceweather.com/> (дата обращения: 20.10.2023).

**I.V. Malneva<sup>1</sup>, M.D. Dokukin<sup>1</sup>, M.A. Anaev<sup>2</sup>, A.R. Akaev<sup>1</sup>, M.M. Khadzhiev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, malnir@mail.ru

<sup>2</sup>Main Directorate of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters for the Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, amaga0773@mail.ru

## **CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF SLOPE PROCESSES IN KABARDINO-BALKARIAN REPUBLIC IN 2022 AND 2023**

**Abstract.** Materials are presented on the occurrence of debris flows and other slope processes in Kabardino-Balkarian Republic in 2022 and 2023, as well as in 2000 and 2017. These years were distinguished by abnormally high summer air temperatures in the Caucasus, and in the Northern Hemisphere as a whole. It was noted that the development features of the most dangerous geological processes (landslides, debris flows, etc.) are due to global climate changes. To assess climate change and major disasters, a typology of atmospheric circulation in the Northern Hemisphere of the Earth, developed under the leadership of B.L. Dzerdzevsky was implemented. Typing materials from 1899 to 2018 posted on the Internet in the public domain at [www.atmospheric-circulation.ru](http://www.atmospheric-circulation.ru). Changes in solar activity and features of space weather in recent years, which are approaching the maximum of the 25th cycle of solar activity, are taken into account.

**Key words:** debris flows; landslides; solar activity; space weather; atmospheric circulation; elementary circulation mechanism.

**Кисляк У.А., Ржаницын Г.А., Фролов Д.М.**

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва, uakislyak@gmail.com, german-r@mail.ru

## **МАССОПЕРЕНОС В СНЕЖНОЙ ТОЛЩЕ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ГРАДИЕНТОВ**

**Аннотация.** Зимой 2022–2023 гг. было проведено исследование кристаллического строения горизонтов глубинной изморози на склонах г. Эльбрус в условиях малоснежного периода зимы. При помощи цифрового портативного микроскопа были получены данные, согласно которым, средний размер кристаллов глубинной изморози равен 1,5–2,5 мм, а наиболее часто встречающаяся форма кристаллов глубинной изморози – плоская скелетная, столбчатая гранная и столбчатая полускелетная формы. В ходе исследования подтвердилась ранее замеченная закономерность, заключающаяся в том, что массоперенос в снежной толще зависит от величины температурного градиента, степени насыщения водяным паром в зонах транзита, на которые, в числе прочего, влияют мощность снежного покрова и абсолютная высота.

**Ключевые слова:** массоперенос; перекристаллизация; температурный градиент; глубинная изморозь; лавинная опасность.

Снежная толща неоднородна, она состоит из разнообразных по своим механическим, физико-химическим, физическим свойствам и кристаллической структуре горизонтов. Зимой 2022–2023 гг. было проведено исследование кристаллического строения горизонтов глубинной изморози на склонах г. Эльбрус в условиях крайне малоснежного периода зимы.

В ходе исследования двух снежных шурфов, заложенных на высоте около 3850 м (выше станции «Гара-Баши») и на высоте приблизительно 3300 м (между станциями «Кругозор» и «Мир») были выявлены особенности кристаллического строения снежного покрова, а также более подробно изучены особые горизонты, сложенные глубинной изморозью. Следует отметить, что в настоящее время выделяется семь основных типов снежных кристаллов: пластинки, звездчатые кристаллы, столбики, иглы, пространственные дендриты, увенчанные столбики [1]. В ходе изучения структуры снежного покрова г. Эльбрус были обнаружены все перечисленные типы кристаллов. При помощи цифрового портативного Wi-Fi микроскопа были получены фотографии снежных кристаллов. Самыми распространенными оказались кристаллы неправильной формы, образованные в результате округления и субирательной перекристаллизации.

Одним из основных объектов исследования во время изучения кристаллического строения снежного покрова на склонах г. Эльбрус была глубинная изморозь. Глубинная изморозь – крупные (до 8 мм) вторичные идиоморфные и скелетные блюдцеобразные и кубообразные ледяные кристаллы, образующиеся в толще снега в слоях температурных скачков [3]. Наличие горизонтов глубинной изморози повышает риск схода снежных лавин, т.к. данный горизонт под давлением вышележащей снежной толщи разрушается

и формирует горизонт скольжения [2]. В ходе исследований в шурфах было обнаружено значительное количество ограненных кристаллов и обломков кристаллов глубинной изморози (рис. 1, 2).



Рис. 1. Ограненные кристаллы с глубины 120 см из шурфа 2 (между станциями «Кругозор» и «Мир»)



Рис. 2. Обломки кристаллов глубинной изморози с глубины 35 см из шурфа 1 (выше станции «Гара-Баши»)

При помощи цифрового портативного микроскопа были получены данные, согласно которым средний размер кристаллов, формирующих горизонты глубинной изморози, равен 1,5–2,5 мм, а наиболее часто встречающаяся форма кристаллов глубинной изморози – плоская скелетная (плоский вариант роста), столбчатая гранная и столбчатая полускелетная формы (столбчатый вариант роста) [4]. Глубинная изморозь образуется в результате массопереноса в снежной толще, т.е. посредством переноса водяного пара, который, в свою очередь, «приходит в движение» при наличии температурного градиента и градиента влажности. На рис. 3 представлены столбчатые гранные, столбчатые скелетные, столбчатые полускелетные, а также плоские гранные («бокаловидные») кристаллы изморози, обнаруженные на метеоплощадке на Эльбрусской учебно-научной базе имени профессора Г.К. Тушинского.



Рис. 3. Кристаллы изморози, обнаруженные в структуре снежного покрова на метеоплощадке Эльбрусской учебно-научной базы имени профессора Г.К. Тушинского

Необходимо отметить, что по сравнению с ограненными кристаллами из шурфов на г. Эльбрус, данная изморозь крупнее, и кристаллы имеют более разнообразную форму. Связано это в первую очередь с тем, что массоперенос здесь более интенсивный, поскольку толщина снежного покрова очень небольшая и поток тепла от почвы сильнее, чем от охлажденной скальной подстилающей поверхности на высоте более 3850 и 3300 м (высоты заложения шурфов). Снежная толща на метеоплощадке в целом более теплая, что предопределяет наличие в ней большего количества водяного пара, чем в шурфах на г. Эльбрус, а значит и обуславливает более интенсивный массоперенос.

Различия в форме и размерах ограненных кристаллов и кристаллов глубинной изморози в шурфе 1 и шурфе 2 на метеоплощадке Эльбрусской учебно-научной базы имени профессора Г.К. Тушинского объяснимы также различными значениями температурных градиентов. При помощи установленных в снежной толще логгеров было выявлено, что наибольшую температуру снежная толща шурфа 1 на глубине 15 м приобретала около 13:00

(30.01,  $-7,5^{\circ}\text{C}$ ), а минимум суточного хода температуры наблюдался 7:00–8:00 (31.01,  $-25^{\circ}\text{C}$ ). Наибольший температурный градиент наблюдался на глубине 95–105 м, и составил  $1^{\circ}\text{C}$  (по данным термометра). В шурфе 2 и на метеоплощадке температурные градиенты между снежными горизонтами были незначительны, однако росту кристаллов глубинной изморози способствовала значительная толщина снежного покрова шурфа 2 и в целом более высокая температура его толщи (а значит, несколько более интенсивный массоперенос), а в случае метеоплощадки – интенсивный массоперенос на границе «подстилающая поверхность (почва) – снежная толща».

Говоря в целом об особенностях кристаллического строения снежной толщи на склонах г. Эльбрус следует отметить, что при увеличении градиента концентрации водяного пара рост кристаллов снега усиливается. Следовательно, градиент температур и скорость перекристаллизации снега увеличиваются с повышением абсолютной высоты в соответствии с работой С.А. Сократова «Массоперенос и перекристаллизация снега в снежном покрове», выполненной в 1988 г. Более того, интенсивность перекристаллизации зависит от толщины снежного покрова – чем мощнее снежная толща, тем сильнее перекристаллизация. Исследованный авторами снежный покров на склонах г. Эльбрус полностью подчиняется вышеперечисленным закономерностям. Горизонты более мощного снежного покрова, исследованного в шурфе 2 (между станциями «Кругозор» и «Мир» на  $h_{\text{абс}} = 3303$  м;  $M = 155$  см) были в целом сильнее перекристаллизованы, несмотря на то, что шурф 1 (выше станции «Гара-Баши» на  $h_{\text{абс}} = 3850$  м;  $M = 205$  см) был расположен выше по склону. Это произошло в результате того, что разница абсолютных высот была менее значительна, чем мощность толщи снега в заложенных шурфах (она составила 50 см), а значит ключевую роль в степени перекристаллизации сыграла именно толщина снежного покрова.

Исследование кристаллического строения снежной толщи склонов г. Эльбрус подтвердило вывод о том, что в структуру снежного покрова входят самые разные структурные элементы, степень перекристаллизации которых зависит главным образом от мощности снежного покрова, а также от абсолютной высоты. Наличие большого количества горизонтов, сложенных ограниченными кристаллами и кристаллами глубинной изморози, создает повышенный риск схода лавин, поскольку данные горизонты обладают низкой устойчивостью на сдвиг, а значит являются ослабленными. Для предупреждения несчастных случаев из-за схода лавин в результате роста глубинной изморози рекомендуется регулярное проведение противолавинных мероприятий.

*Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0), «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4).*

## Список литературы

1. Войтовский К.Ф. Механические свойства снега. М.: Наука, 1977. 126 с.
2. Войтовский К.Ф. Лавиноведение. М.: Изд-во МГУ, 1989. 156 с.
3. Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 527 с.
4. Коломыц Э.Г. Кристалломорфологический атлас снега: пособие для снеголавинных станций. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 214 с.

**U.A. Kislyak, G.A. Rzhanitsyn, D.M. Frolov**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, uakislyak@gmail.com, german-r@mail.ru

## MASS TRANSFER IN SNOW UNDER HIGH TEMPERATURE GRADIENTS

**Abstract.** In winter of 2022–2023 research on crystalline structure of depth hoar snow horizons on the slopes of Elbrus during a period of winter with little snow was carried out. Structural features of snow crystals forming depth hoar horizons were identified, and the features and patterns of their formation were established. With the help of a digital portable microscope data was obtained. According to it the average size of depth hoar crystals is 1.5–2.5 mm, and the most common forms of depth hoar crystals are flat skeletal, columnar faceted and columnar semi-skeletal ones. The study confirmed a previously noticed pattern that mass transfer in snow depends on the magnitude of the temperature gradient, the degree of saturation with water vapor in transit zones, which, among other factors, are affected by thickness of snow cover and absolute height.

**Key words:** mass transfer; recrystallization; temperature gradient; depth hoar; avalanche danger.

**Ермолов А.А.<sup>1</sup>, Землянов И.В.<sup>2</sup>, Огородов С.А.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ геоэкологии Севера,  
г. Москва, ermолов@geogr.msu.ru

<sup>2</sup>Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, г. Москва

## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РИСКОВ РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КОСЫ АРАБАТСКАЯ СТРЕЛКА АЗОВСКОГО МОРЯ**

**Аннотация.** Рассмотрены отдельные результаты рекогносцировочного обследования территории перспективного освоения косы Арабатская Стрелка на участке от г. Геническа до пос. Стрелковое, проводившегося с целью предварительной оценки рисков развития опасных геологических и гидрометеорологических процессов и явлений. Установлены особенности рельефа и состав отложений береговой зоны Азовского моря и получены фактические данные об относительных высотах поверхности Косы, являющегося естественным защитным барьером, препятствующим проникновению вод в периоды штормовых нагонов Азовского моря редкой повторяемости.

**Ключевые слова:** Азовское море; Коса Арабатская Стрелка; береговой бар; затопление.

П-ов Арабатская Стрелка расположен на северо-востоке Крымского п-ова и отделяет мелководный залив Сиваш от акватории Азовского моря. Протяженность этой крупнейшей аккумулятивной формы региона превышает 117 км. Ширина ее в южной части составляет от нескольких сотен метров до 1 км, высота до 4-5 м, в северной части коса значительно расширяется, достигая местами 4-5 км.

Перспективы освоения Арабатской Стрелки на участке от г. Геническа до пос. Стрелковое определили необходимость проведения специализированных рекогносцировочных работ с целью предварительного изучения геоморфологического и геологического строения береговой зоны и оценки рисков возникновения катастрофических последствий развития опасных геологических и гидрометеорологических процессов и явлений, к числу которых относятся штормовые нагоны и катастрофическое повышение уровня воды Азовского моря и залива Сиваш, затопление и подтопление территории Арабатской Стрелки, а также ветро-волновое воздействие и разрушение берегов. Основными задачами работы являлись определение участков, подверженных затоплению в периоды штормовых нагонов редкой повторяемости, получение сведений о рельефе береговой зоны, а также оценка техногенной трансформации рельефа.

Полевое обследование территории Арабатской Стрелки на участке между г. Геническом и пос. Стрелковое (общая протяженность около 40 км), проводилось в мае 2023 г. Крупномасштабная геолого-геоморфологическая съемка береговой зоны Азовского моря сопровождалась сбором и анализом архивных материалов и документальных свидетельств развития опасных процессов, оценкой общей трансформации рельефа за период хозяйственного

использования территории. С целью получения морфометрических характеристик рельефа и оценки относительных высот берегового барьера было выполнено инженерно-геодезическое профилирование береговой зоны по заранее намеченным профилям с использованием высокоточного оборудования.

Азовский берег косы Арабатская Стрелка относится к выровненным аккумулятивным берегам, подверженным воздействию волнения открытого моря и обладающим сравнительно большими запасами рыхлого материала как на суше, так и на подводном склоне. На рассматриваемом участке берег характеризуется выровненным контуром береговой линии и состоит из пляжа неполного профиля шириной в среднем 15–20 м, на отдельных участках до 30 м, и преимущественно отмелого подводного берегового склона, осложненного серией подводных береговых валов. В составе наносов преобладает раковинный детрит и ракушка с примесью песка мелкого и пылеватого.

Пляж прислонен к береговому барьеру шириной 25–35 м. Высота этой аккумулятивной формы на участке исследований изменяется в диапазоне от 1,0 до 4,0 м, за ним располагается более низкая поверхность, сформированная древними береговыми валами высотой до 1,0–1,5 м, на отдельных участках которой отмечаются признаки переувлажнения, заболоченные участки и водоемы техногенного происхождения на месте изъятий песчаного материала. Как и пляж, береговой барьер сложен раковинным детритом и ракушей с примесью песка различной крупности.

Исторические данные наблюдений за гидрометеорологическим режимом Азовского моря в районе г. Геническа и Арабатской Стрелки свидетельствуют о том, что береговая зона подвержена значительному воздействию морских вод вследствие возникающих экстремальных колебаний уровня моря. Следствием экстремальных колебаний уровня (штормовых нагонов) является затопление прибрежных территорий, изменения конфигурации береговой линии, на отдельных участках – разрушение берегов под действием волнения.

Исследования, посвященные причинам возникновения и характеру развития штормовых нагонов на побережье Азовского моря, проводились на протяжении многих лет и подтверждают серьезную опасность подобных экстремальных подъемов уровня. В случае выполнения работ по проектированию и строительству сооружений в береговой зоне для каждого конкретного случая требуется выполнение специализированных расчетов для получения оценок вероятного воздействия гидрометеорологических факторов – ветра, штормового волнения, экстремальных повышений уровня моря.

Рекогносцировочное обследование подтвердило возможность затопления территории Арабатской Стрелки в периоды штормовых нагонов редкой повторяемости. По имеющимся данным высота уровня моря может достигать 323 см (требует уточнения) и более. Периодическому затоплению подвергаются низкие поверхности в северной части Арабатской Стрелки (о-ов Крячин и прилегающие участки). Это приводит к затоплению автомобильной дороги «Геническ – Счастливцево», что подтверждается документально. Особенно

сильные штормы в Азовском море, сопровождавшиеся катастрофическими разрушениями, имели место 28–29 октября 1969 г. и 24 сентября 2014 г.

Береговой барьер является естественной защитой от затопления лежащей за ним более низкой поверхности Арабатской Стрелки. Основным критерием, определяющим возможность затопления территории в периоды штормовых нагонов, является высота этой аккумулятивной формы. Кроме того, устойчивость барьера зависит от его ширины – чем он шире, тем ниже вероятность разрушения его вершины штормовыми волнами. На берегу поверхность берегового барьера нередко нарушена в результате проезда автомобильной и грузовой техники, рекреационной деятельности и пр. Нарушения рельефа и растительного покрова в пределах берегового барьера ведут к снижению высоты этой аккумулятивной формы, способствуют развитию эоловых процессов (дефляции) и могут вызывать локальный размыв берега.

В естественных условиях аккумулятивный берег Арабатской Стрелки стабилен. Береговой барьер может рассматриваться как основа системы инженерной защиты территории от затопления. Проектирование инженерной защиты должно осуществляться после проведения детальных инженерно-гидрометеорологических изысканий, в т.ч. литодинамических исследований и гидрометеорологического моделирования, с учетом комплексного развития прибрежной территории.

**A.A. Ermolov<sup>1</sup>, I.V. Zemlianov<sup>2</sup>, S.A. Ogorodov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, ermolov@geogr.msu.ru

<sup>2</sup>Zubov State Oceanographic Institute, Moscow

## **PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE RISKS OF DANGEROUS GEOLOGICAL PROCESSES AND HYDROMETEOROLOGICAL PHENOMENA IN THE NORTHERN PART OF THE ARABATSKAYA STRELKA SPIT OF THE AZOV SEA**

**Abstract.** The separate results of the reconnaissance survey of the territory of the prospective development of the Arabatskaya Strelka in the area from the town of Genichesk to the village are considered. Small arms, conducted for the purpose of preliminary assessment of the risks of the development of dangerous geological and hydrometeorological processes and phenomena. The features of the relief and composition of sediments of the coastal zone of the Sea of Azov have been established and actual data on the relative heights of the surface of the Spit, which is a natural protective barrier preventing the penetration of waters during periods of storm surges of the Sea of Azov of rare recurrence, have been obtained.

**Key words:** Azov Sea; Arabatskaya Strelka spit; coastal barrier; flooding.

**Педанов А.А., Сократов С.А.**

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва, a-pedanov@mail.ru

## **РАСЧЕТ ВЕСА СНЕГОВОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ КАК СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ**

**Аннотация.** Проведен анализ современного состояния нормативной базы по вопросу расчета снеговых нагрузок. Предложен новый алгоритм, который с помощью статистических методов анализа позволяет рассчитать значения веса снегового покрова, превышающего числа раз в заданное количество лет. По результатам обработки 517 временных рядов наблюдений за снежным покровом на метеостанциях была построена карта распределения веса снегового покрова на территории России. Для отдельных регионов нормативные значения веса снегового покрова требуют корректировки.

**Ключевые слова:** снег; снегонакопление; снежный покров; снеговая нагрузка; вес снежного покрова; строительные нормативы.

### *Введение*

В настоящее время, в связи с разрушением и повреждением зданий и сооружений под давлением снега на кровли, все более актуальной становится проблема актуализации норм расчета и картирования снеговых нагрузок на территории Российской Федерации. Возникающие проблемы в связи с выпадением и давлением снега на кровли зданий наносят значительный ущерб экономике некоторых регионов страны. Эти проблемы приводят к тому, что на территории России ежегодно регистрируются случаи разрушения и повреждения кровель зданий. Помимо материального ущерба, это может приводить и к гибели людей. В большинстве случаев подобные аварийные ситуации возникают в результате недоучета величин снеговых нагрузок при проектировании объектов [3].

### *Методика расчета снеговых нагрузок в России*

Величина снеговых нагрузок в первую очередь определяется расчетным весом снегового покрова на 1 м<sup>2</sup> горизонтальной поверхности земли  $S_g$ , превышающий один раз в  $n$  лет.

*Методика расчета снеговых нагрузок* предусматривает использование для аппроксимации данных статистических законов распределения. Их выбор определяется соответствием аппроксимирующей функции наблюденным значениям случайной величины и оценивается с помощью тех или иных критериев согласия. В нормативных технических документах различных стран, в т.ч. в Еврокоде [7], для аппроксимации наблюденных значений веса снегового покрова (далее – ВСП), наиболее широко применяются распределения: Гумбеля типа I, логнормальное и Вейбулла с базовой вероятностью превышения (обеспеченностью) 0,02, т.е. в среднем превышаемой один раз в 50 лет.

Актуальными нормами в области расчета снеговых нагрузок на сегодняшний день является СП 20.13330.2016 [6]. Методика расчета была разработана Ф.В. Бобровым и В.А. Отставновым [1], описана также в работе [9]. При составлении норм для всех метеостанций ряд данных по ежегодным максимумам веса снегового покрова аппроксимировался теоретическим распределением Гумбеля [4]. При районировании веса снегового покрова на территории РФ было выделено восемь районов со значениями от 0,5 до 4,0 кПа (табл. 1).

Таблица 1  
Значения веса снегового покрова для снеговых районов (СП 20.13330.2016 [6])

Снеговые районы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$S_g$ , кПа	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0

### *Алгоритм расчета веса снегового покрова*

При анализе результатов исследования [8] возникает вопрос: насколько обосновано использование одного теоретического распределения для аппроксимации максимумов веса снегового покрова? Возможно, стоит использовать различные теоретические распределения для различных метеостанций в разных географических условиях.

*Исходные данные.* Для подтверждения или опровержения указанного выше предположения необходимо располагать большим массивом данных по изменению веса снегового покрова во времени. Такие ряды данных были накоплены в сети станций системы Госкомгидромет с 1930-х гг. при выполнении снегомерных съемок. Часть этих данных находится в свободном доступе. Использованный в работе массив данных содержит характеристики снежного покрова по данным маршрутных снегомерных съемок. В массиве приведены данные 517 метеорологических станций России с 1966 г. по настоящее время. Список станций формировался на основе перечня Глобальной службы атмосферы Всемирной метеорологической организации [2].

Для каждой выбранной метеостанции были рассчитаны ежегодные максимумы веса снегового покрова за период с 1966 по 2020 гг., и затем эти максимумы были собраны в отдельные временные ряды. Эти временные ряды впоследствии использовались в расчетах.

*Оценка применимости теоретических распределений для аппроксимации фактических данных.* Для того, чтобы определить значение ВСП, превышаемого числа раз в большое количество лет необходимо иметь относительно длинные временные ряды. Поэтому при нормировании ВСП с заданной обеспеченностью, эмпирическое распределение фактических данных необходимо аппроксимировать каким-либо известным теоретическим распределением, для того чтобы с помощью полученной статистической модели искусственно

продлить короткие временные ряды. Разработанный в ходе работы алгоритм для решения этой задачи проводился в несколько этапов.

**1. Проверка данных на нормальность.** При аппроксимации в первую очередь данные проверялись на нормальность при помощи статистических критериев Шапиро Уилка, критерия Д'Агостино, теста Пирсона и Андерсона-Дарлинга. Эти критерии позволяют принять или отклонить гипотезу о подчинении данных нормальному закону распределения.

**2. Подбор параметров предполагаемого распределения.** Выдвинув гипотезу о том, что определенный набор данных подчиняется какому-либо распределению, необходимо сначала подобрать параметры этого распределения так, чтобы это распределение подходило набору данных по его основным статистическим параметрам, таким как среднее значение, среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  и эксцесс  $E$ . Для выполнения этой задачи параметры этого теоретического распределения в разработанном алгоритме подбирались методом максимального правдоподобия.

**3. Проверка согласия распределения с исходными данными.** После подбора параметров предполагаемого распределения, его согласованность с исходными данными проверялась непараметрическим критерием согласия Колмогорова-Смирнова. Этот критерий предназначен для проверки простых гипотез о принадлежности анализируемой выборки некоторому известному закону распределения. Графический метод использовался как дополнение к аналитическим методам. Для визуального анализа строились графики гистограмм, а также графики кумулятивных функций теоретического и эмпирического распределения.

Был проведен расчет сугубых нагрузок определенной обеспеченности. Наиболее подходящее к исходным данным распределение впоследствии использовалось для дальнейших расчетов веса сугубого покрова с различным периодом повторяемости. Проведение работы по аппроксимации данных позволяло задавать любой период повторяемости и обеспеченность веса сугубого покрова.

## *Результаты*

При помощи разработанного алгоритма было обработано 517 временных рядов по метеостанциям на территории России. По полученным значениям веса сугубого покрова, превышающего раз в 50 лет, была построена карта (рис.). Интерполяция между метеостанциями проводилась методом радиально базисных функций.

Как и предполагалось при постановке проблемы, значения веса сугубого покрова заданной обеспеченности, рассчитанные по вышеописанному алгоритму, оказались существенно выше значений, нормируемых в СП 20.13330.2016 [6]. В качестве проверки и верификации разработанного алгоритма по расчету ВСП, как составляющей сугубой нагрузки, стоит сравнить

полученные значения ВСП с обоснованными региональными рекомендациями, требующими изменения принятых нормативов [5], а также с актуальными нормативами РФ [6]. Сравнение приведено в табл. 2.

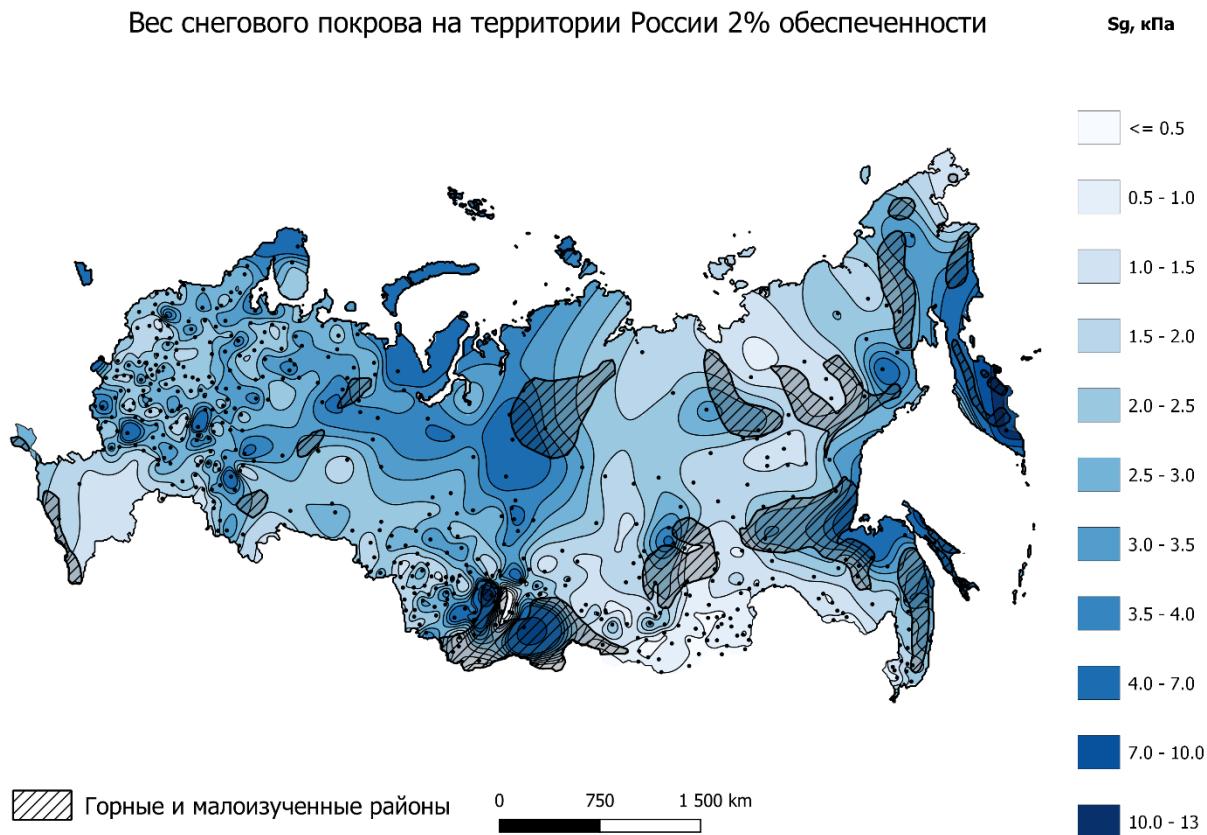


Рис. Распределение веса снегового покрова на территории России. Точками отражено положение метеостанций

Таблица 2  
 Сравнение веса снегового покрова 2% обеспеченности, рассчитанного по алгоритму с нормативными документами и рекомендациями

Метеостанция / населенный пункт	Алгоритм	(Рекомендации..., 2009) [5]	СП 20.13330.2016 [6]
Александровск- Сахалинский	3,7	4,0	3,0
Корсаков	4,4	4,5	3,0
Тымовское	4,5	5,5	3,5
Южно-Сахалинск	5,9	6,0	4,0
Долинск	7,7	6,0	4,0
Ноглики	7,3	4,0	4,0
Онор	4,0	3,2	2,0

Исходя из сравнения (см. табл. 2), можно сделать вывод, что полученные по алгоритму значения веса снегового покрова 2% обеспеченности значительно

ближе к основанным на фактических данных Рекомендациях... [5], чем к принятым для той же территории нормам СП 20.13330.2016 [6].

Сравнение указывает на то, что разработанный алгоритм достаточно корректно определяет вес снегового покрова. Необходимо заметить, что рассчитываемые значения веса снегового покрова действительны для равнинных и прибрежных районов, т.к. большинство анализируемых метеостанций находилось ниже 300 м н.у.м. Для горных районов необходимо учитывать градиент высоты снегового покрова.

### *Заключение*

Для расчета веса снегового покрова был предложен новый алгоритм, который с помощью статистических методов анализа позволяет рассчитать значения веса снегового покрова, превышающего раз в заданное количество лет. Проведенные по алгоритму расчеты показали, что, как и отмечалось ранее для отдельных регионов, нормативные значения веса снегового покрова занижены и требуют корректировки. Такая корректировка может быть произведена с использованием, к примеру, предложенного алгоритма.

По результатам обработки 517 временных рядов наблюдений за снежным покровом на метеостанциях была построена карта распределения веса снегового покрова на территории России по новому алгоритму.

### **Список литературы**

1. Бобров Ф.В., Отставнов В.А. О новом районировании территории России по весу снегового покрова земли // Бюллентень строительной техники. 2004. № 5. С. 18–24.
2. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных «маршрутные снегомерные съемки». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620279 от 20.03.2013.
3. Лобкина В.А., Генсиоровский Ю.В. Снеговые нагрузки о. Сахалин: распространение и ущербы // Материалы 1-й Дальневосточной междисциплинарной молодежной научной конференции «Современные методы научных исследований». Владивосток: Рея, 2011. С. 80.
4. Назаров Ю.П., Лебедева И.В., Попов Н.А. Региональное нормирование снеговых нагрузок в России // Строительная механика и расчет сооружений. 2006. № 3. С. 71–77.
5. Рекомендации по расчету снеговых нагрузок на сооружения в Сахалинской области. Южно-Сахалинск: Изд-во Министерства строительства Сахалинской области, 2009. 13 с.
6. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*».
7. EN 1991 Eurocode 1. Actions on structures.

8. Formichi P., Del Corso R. Statistics of ground snow loads in Italy // Proceedings of the 4th International Conference on snow engineering “Snow engineering: recent advances and developments”. London, UK: Routledge, 2000. P. 161–166.
9. Otstavnov V.A., Lebedeva I.V. The new map of ground snow loads for Russian building code // Proceedings of the fifth International Conference on snow engineering “Snow engineering”. Rotterdam, The Netherlands: Balkema, 2004. P. 157–160.

**A.A. Pedanov, S.A. Sokratov**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, a-pedanov@mail.ru

## **ESTIMATION OF THE GROUND SNOW LOAD ON THE TERRITORY OF RUSSIA AS A COMPONENT OF ROOF SNOW LOAD**

**Abstract.** The current state of the standardization on the issue of calculating ground snow loads has been analyzed. A new algorithm is proposed, which makes it possible to calculate the values of ground snow load of different return periods. Based on the results of processing 517 time series of observations of snow cover at weather stations, a map of ground snow load in Russia was made. For some regions, the normative values of ground snow loads require actualization.

**Key words:** snow; snow accumulation; snow cover; ground snow load; roof snow load; building code.

**Ушакова Л.А.<sup>1</sup>, Сучилин А.А.<sup>1</sup>, Сучилина З.А.<sup>2</sup>, Воскресенский И.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва, la.ushakova@mail.ru,  
asuhov308@gmail.com, isvoskresensky@rambler.ru

<sup>2</sup>Институт водных проблем РАН, г. Москва, mezozoya1@mail.ru

## **РАЗРАБОТКА ЛОКАЛЬНОЙ ГИС ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ «ЗОН РИСКА» ПРОЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ**

**Аннотация.** Территория исследований находится в юго-восточной части Прионежья в Вытегорском районе Вологодской области РФ. Исследования проводились в двух комплексных ландшафтных заказниках Андомской возвышенности: Верхне-Андомском и Атлека, являющимся водоразделом трех крупнейших морских бассейнов Европы: Балтийского, Беломорского и Каспийского, а также в границах геологического объекта «Памятник природы Андомская Гора», Прионежской низины, в составе охраняемого природного комплекса «Онежский». Зона риска определяется как степень вероятности проявления современных опасных рельефообразующих процессов. Оценка проведена для особо охраняемых природных территорий (ООПТ), расположенных на Андомской возвышенности и Прионежской низине юго-восточной части побережья Онежского озера. Локальная геоинформационная система включает основной топографический блок (рельеф, гидрология и другие), а также тематические блоки - «Современные рельефообразующие процессы» и «Зона риска» в формате векторных и растровых карт, таблиц, с соответствующей информацией в базе данных. Оценочная шкала зон риска опасных современных рельефообразующих процессов (СРП) включает четыре степени: низкая, средняя, высокая и очень высокая. Зона риска ООПТ Верхне-Андомского ландшафтного заказника соответствует уровню «средняя». Зона риска ООПТ Атлека определена как «средняя» и «высокая». Они определяются незначительными изменениями в рельефе карстового плато Андомской возвышенности, совершамыми современными рельефообразующими процессами. Опасный рельефообразующий процесс «покрытый карст» («русский карст») играет ведущую роль в их парагенезах, преобразующих рельеф вторичной ледниковой равнины. Рельеф берега Онежского озера ООПТ «Памятник природы Андомская Гора» интенсивно изменяется под воздействием современных рельефообразующих процессов. Опасные процессы обладают «очень высокой» и «высокой» степенью риска. Ведущую роль играют абразия и карстово-суффозионный процесс, сопровождаемые обваливанием, оползанием и оврагообразованием.

**Ключевые слова:** ГИС; ООПТ; опасные современные рельефообразующие процессы; зона риска.

### *Введение*

Оценка зон риска проводилась для особо охраняемых природных территорий (ООПТ) ландшафтных заказников и памятника природы, располагающихся на юго-западном побережье Онежского озера на Андомской возвышенности и Прионежской низине.

Цель исследования заключается в определении зоны риска как степени вероятности проявления опасных современных рельефообразующих процессов, таких как: абразия, карст и его разновидности, оврагообразование, обваливание

и оползание в пределах ООПТ, с применением локальной геоинформационной системой (ГИС).

В ходе исследования решались следующие задачи:

1. Создание локальной ГИС ООПТ.
2. Определение критериев оценки динамического состояния рельефа и комплексов (парагенёзов) современных рельефообразующих процессов (СРП) ООПТ.
3. Разработка критериев оценки зон риска опасных СРП ООПТ.

### *Материалы и методы исследования*

При исследовании ландшафтных заказников Верхне-Андомский, Атлека, которые расположены на Андомской возвышенности, и «Памятника природы Андомская Гора» (Прионежская низина) использовались карты комплексов форм рельефа (морфолитогенной основы ландшафта) [12]; карты парагенёзов СРП; карты «энергии рельефа» (по А.И. Спиридонову) [13].

Геоморфологическое картографирование проведено по материалам полевых и аналитических исследований рельефа ООПТ и отложений озерно-аллювиального и ледникового генезиса эоплейстоцен-неоплейстоценового возраста. Морфометрический анализ осуществлен по топографическим картам масштаба 1:100 000 [4, 11].

Локальные комплексы форм рельефа ООПТ характерны для вторичной ледниковой равнины Андомской возвышенности и Прионежской низины. Наиболее широкое распространение имеют холмы и их гряды, водноледниковые зандры, склоны, озерно-болотные котловины и долины «малых» рек, сложенные ледниковыми отложениями и дочетвертичными отложениями (известняками карбона).

Комплексы форм рельефа ландшафтных заказников Верхне-Андомский и Атлека включают фрагменты карстового плато. Формы рельефа представлены «структурными террасами», балками, ложбинами, котловинами и западинами, в пределах которых на дневную поверхность выходят дочетвертичные карстующиеся породы. Днища котловин, западин, как правило, заозерены и заболочены. На возвышенных участках плато в днищах осушенных западин, а также в карьерах по добыче песчано-гравийных сырья выявлены «поноры» – субвертикальные каналы поглощения поверхностных вод, заполненные обломками известняков и других пород [3]. В их пределах установлены воронкообразные понижения карстового происхождения [9, 10].

В пределах ООПТ установлены опасные современные рельефообразующие процессы: абразия, обваливание, оползание, карстово-суффозионно-эрэзионный (по Н.А. Гвоздецкому), оврагообразование и их парагенёзы [8]. Они наиболее активно протекают в береговой зоне Онежского озера в западной части ООПТ «Памятник природы Андомская Гора» [4].

На территории ООПТ ландшафтных заказников Верхне-Андомский и Атлека установлены проявления опасных СРП: «покрытого карста» («русского карста» по Г.А. Максимовичу) и карстово-суффозионно-эрозионные. Глубина благоприятной зоны карстообразования оценивается в 50 м [6]. Величина «энергии рельефа», определяющая суммарную потенциальную интенсивность современных рельефообразующих процессов, колеблется от 15 до 50 м и более. Она составляет 15–45 м в пределах ООПТ ландшафтных заказников Верхне-Андомский и Атлека, расположенных на карстовом плато.

Ведущую роль в парагенезах СРП играет опасный процесс «покрытый карст».

В пределах ООПТ «Памятник природы Андомская Гора» «энергия рельефа» достигает 50 м и более. Ведущую роль в парагенезе СРП береговой зоны Онежского озера играет опасный процесс «абразия». По оценкам местных старожителей н.п. Гневашевская отступание клифа (абразионного уступа берега Онежского озера) составляет около 200–300 м за 50 лет, т.е. в среднем около 6 м в год. Эта оценка не противоречит ширине (до 5 м) подводной отмели береговой зоны [2].

**Методика исследования** основывается на оценке роли катастрофических и опасных процессов рельефообразования в эволюции рельефа [1]. Динамическое состояние современных рельефообразующих процессов и зона риска оцениваются в шкалах, содержащих четыре степени изменения. Оно устанавливается на основании критериев изменчивости «элементарных поверхностей» (по А.И. Спиридовону) [13], «энергии рельефа» и разнообразия СРП в пределах ООПТ.

Проект сформирован на платформе ГИС MapInfo. Территориальный охват, исследуемого участка, составляет 36°00'–37°00' в.д., 60°40'–62°00' с.ш.

**Методы исследования включают:** актуализацию топографической информации по космическим снимкам с сервисов Yandex и Bings Maps, а также использование материалов сервисов ООПТ России лаборатории геоинформационных технологий ФГБУ «ААНИИ», Минприроды РФ и Правительства Вологодской области. В юго-восточной части Прионежья исследованы территории Верхне-Андомского ландшафтного заказника, ландшафтного заказника Атлека и «Памятника природы Андомская Гора» [4].

При формировании структуры ГИС использованы топографические источники (листы карт масштаба 1:100 000) формализованные в векторный формат ГИС и приведенные к единой системе координат (проекция Гаусса-Крюгера, 7 зона, Пулково-42).

Следующий этап – составление базы данных ГИС «ООПТ Юго-восточного Прионежья», которая включает блоки «топографический», «рельеф», «современные рельефообразующие процессы», «зоны риска опасных рельефообразующих процессов», содержащие соответствующие слои. Например, блок «Топографический» включает границы субъектов РФ, ООПТ, горизонтали, высотные отметки и др. Блок «Элементарные формы рельефа»

состоит из слоев, представленных векторными картами комплексов форм рельефа ООПТ. Блок «Современные рельефообразующие процессы» включает векторные карты парагенезов СРП ООПТ. Блок «Зоны риска ООПТ» состоит из табл. 1 и 2, характеризующих рельеф и зоны риска опасных СРП.

Таблица 1

Блок «зона риска» ГИС ООПТ юго-восточной территории Прионежья. Степени динамического состояния комплексов форм рельефа и парагенезов СРП; степени вероятности проявления опасных СРП («зона риска») (по Г.С. Ананьеву, 1998 [1]; с дополнениями и изменениями авторов)

№ п/п	Степень динамического состояния «элементарных поверхностей» форм рельефа (ЭПФР) (по А.И. Спиридову)	Степень динамического состояния комплекса (парагенезиса) СРП; превышения минимальных значений «энергии рельефа» в пределах ООПТ	«Зона риска – степень вероятности проявления опасных СРП»
1.	Неизмененная («ненарушенность» ЭПФР)	Равновесная	Низкая
2.	Незначительно измененная («незначительная нарушенность» до 25% ЭПФР)	Неравновесие; превышение минимальных значений «энергии рельефа» на 15–30 м	Средняя
3.	Значительно измененная («значительная нарушенность» 25– 50% ЭПФР)	Переходная; превышение минимальных значений «энергии рельефа» на 30–45 м	Высокая
4.	Очень значительно измененная («очень значительная нарушенность» 50– 75% ЭПФР)	«Жесткая потеря устойчивости»; превышение «порогового значения «энергии рельефа» 45–50 м	Очень высокая

### *Результаты исследования и их обсуждение*

ООПТ ландшафтных заказников находятся в пределах карстового плато Андомской возвышенности. Однако рельеф Верхне-Андомской ООПТ характеризуется сочетанием холмов, озерных и заболоченных котловин, а рельеф ООПТ «Атлека» – «платообразный» со структурными террасами и ложбинами. Морфологии рельефа двух ООПТ резко отличаются друг от друга.

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
 «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
 г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

Таблица 2

Блок «зона риска» ГИС ООПТ ЮВ Прионежья. Характеристики рельефа и современных рельефообразующих процессов, степени риска проявления опасных рельефообразующих процессов («зона риска»)

ООПТ	Комплексы форм рельефа (КФР)	Горные породы: дочетвертичные и чехол рыхлых четвертичных отложений; мощность чехла, м	«Энергия рельефа», м	Степень динамического состояния ЭПФР	Парагенезы СРП: «системообразующий» и «распространенные» (по В.Т. Фролову) современный рельефообразующий процесс; кол-во	Степень динамического состояния парагенеза СРП; превышение минимальных значений «энергии рельефа» в пределах ООПТ	«Зона риска» – степень вероятности проявления опасных СРР
Ландшафтный заказник «Верхне-Андомский»	Комплекс холмов, гряд, котловин, западин	Известняки и морена, водоно-ледниковые; от 0 до не менее 20 м	20–30	Незначительно измененная	«Покрытый карст», склоновый и озерный; 5	Равновесная; превышение до 10 м	Средняя
Ландшафтный заказник «Атлека» (восточная часть)	Комплекс структурных террас, ложбин и западин	Известняки и морена, водоно-ледниковые, болотные; от 0 до не менее 20 м	15–25	Незначительно измененная	Склоновый, заболачивание; 4	Равновесная; превышение до 10–15 м	Средняя

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
 «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
 г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

ООПТ	Комплексы форм рельефа (КФР)	Горные породы: дочетвертичные и чехол рыхлых четвертичных отложений; мощность чехла, м	«Энергия рельефа», м	Степень динамического состояния ЭПФР	Парагенезы СРП: «системообразующий» и «распространенные» (по В.Т. Фролову) современный рельефообразующий процесс; кол-во	Степень динамического состояния парагенеза СРП; превышение минимальных значений «энергии рельефа» в пределах ООПТ	«Зона риска» – степень вероятности проявления опасных СРР
Ландшафтный заказник «Атлека» (западная часть)	Комплекс вершинных поверхностей холмов, ложбин, западин	Известняки и морена, водоно-ледниковые пески, глины галечники, торф; от 0 до не менее 20 м	30–45	Незначительно измененная	«Покрытый карст», заболачивание); 7	Переходная; превышения до 35 м	Высокая
Памятник природы «Андомская Гора» (западная часть)	Комплекс склонов, ложбин, оврагов и западинной зоне Онежского озера	Пески и алевриты уплотненные и морена, водоно-ледниковые галечники суглинки и супеси; от 0 до не менее 25 м	До 45	«Жесткая потеря устойчивости»	Абрация, оврагообразование, обваливание и оползание; 4	«Жесткая потеря устойчивости»; превышение порогового значения «энергии рельефа» 50 м и более	Очень высокая

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
 «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
 г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

ООПТ	Комплексы форм рельефа (КФР)	Горные породы: дочетвертичные и чехол рыхлых четвертичных отложений; мощность чехла, м	«Энергия рельефа», м	Степень динамического состояния ЭПФР	Парагенезы СРП: «системообразующий» и «распространенные» (по В.Т. Фролову) современный рельефообразующий процесс; кол-во	Степень динамического состояния парагенеза СРП; превышение минимальных значений «энергии рельефа» в пределах ООПТ	«Зона риска» – степень вероятности проявления опасных СПР
Памятник природы «Андромская Гора» (восточная часть)	Грядово-холмистая и ложбинно-западинная вершинная поверхность холма и пологий террасированный склон с западинами, ложбинами, балками и оврагами	Пески и алевриты уплотненные и морена, галечники водно-ледниковые, суглинки супеси; до 20 м	До 50	Переходная	Карстово-суффозионный, склоновый и оврагообразование; 3	«Переходная»; предпороговые значения 45–50 м «энергии рельефа»	Высокая

Последниковый рельеф сформирован опасным рельефообразующим процессом «покрытого карста» в комплексе с эрозией и склоновыми процессами. Скорость карстовой денудации оценивается в 8–18 мм/1000 лет [6] или 80–180 м за период последниковья в 10 тыс. лет. Скорость карстовой денудации не противоречат абсолютному возрасту ледниковых отложений, залегающих на холмах Верхне-Андомской ООПТ [11]. Динамические состояния современных рельефообразующих процессов двух вышеупомянутых ООПТ достаточно резко отличаются друг от друга. Верхне-Андомский ландшафтный заказник характеризуется относительно невысокими значениями «энергии рельефа» (20–30 м), их незначительной изменчивостью (до 10 м) и разнообразием парагенезов СРП. «Зона риска» опасных СРП соответствует степени «средняя» (см. табл. 2). Ландшафтный заказник «Атлека» характеризуется «энергией рельефа» и количеством парагенезов СРП, значения которых в западной части ООПТ существенно превышают аналогичные показатели в восточной части ООПТ. Соответственно, «зона риска» опасных СРП в западной части ООПТ выше, чем в восточной (см. табл. 2). Выявленные различия в динамике современных рельефообразующих процессов, позволяют полагать, что они находятся в различных состояниях развития. В результате локальной активизации опасного процесса «покрытого карста» рельеф ООПТ Верхне-Андомского ландшафтного заказника достиг состояния «жесткой потери устойчивости и перешел на поздний уровень динамического равновесия» [1].

Динамическое состояние парагенеза СРП ООПТ «Памятник природы Андомская Гора» определяется: 1) высокими показателями в 50 и более метров «энергии рельефа»; 2) ограниченным количеством СРП в парагенезах восточной и западной частях (см. табл. 2). Парагенезы состоят из опасных рельефообразующих процессов, причем ведущую роль играет карстово-суффозионный процесс. Восточная часть ООПТ занимает склон Андомского холма. В ее пределах развиваются два опасных рельефообразующих процесса: карстово-суффозионный и оврагообразование. Зона риска достигла высокой степени вероятности проявления опасных СРП, что обусловлено предпороговыми значениями (45–50 м) «энергии рельефа». Западная часть ООПТ находится в береговой зоне Онежского озера. Парагенез опасных СРП береговой зоны и озера сходны по динамическому состоянию с береговой зоной абразионно-аккумулятивного берега Черного моря в районе г. Севастополя [7]. Рельеф береговой зоны «Памятника природы Андомская гора» резко трансформируется опасными современными рельефообразующими процессами: карстово-суффозионным процессом, оврагообразованием, обваливанием и оползанием при ведущей роли абразии. Зона риска имеет степень «жесткая потеря устойчивости» парагенеза опасных рельефообразующих процессов. Можно полагать, что разработка мер инженерной защиты берега должна предусматривать изучение абразии в подзоне прибоя в зависимости от характера перемещения наносов в береговом потоке наносов [5].

## *Выводы*

Структура ГИС «ООПТ ЮВ Прионежья» содержит следующие блоки базы данных: «Топографический», «Рельеф», «Современные рельефообразующие процессы» и «Зоны риска», включающая растровые карты среднего масштаба ООПТ, а также таблицы современных рельефообразующих процессов и «зон риска» опасных СРП.

Шкалы оценки современных рельефообразующих процессов и зон риска опасных СРП включают четыре степени их состояния, отражающих уровни динамического равновесия и релаксации парагенеза СРП.

Критерии оценки степени динамического состояния СРП и зон риска основаны на показателях изменения элементарных поверхностей форм рельефа и «энергии рельефа».

«Зона риска» СРП ООПТ Верхне-Андомского ландшафтного заказника соответствует уровню «средняя». «Зона риска» СРП ООПТ «Атлека» соответствует уровням «средний» и «высокий». «Зона риска» ООПТ «Памятник природы Андомская Гора» соответствует градациям «высокий» и «жесткая потеря устойчивости» в береговой зоне. Парагенез современных рельефообразующих процессов береговой зоны включает опасные процессы: абразию, оврагообразование, карстово-суффозионный процесс, обваливание и оползание. Абрация береговой зоны является основной причиной разрушения территории памятника природы и обусловлена динамикой перемещения наносов в их береговом потоке.

## **Список литературы**

1. Ананьев Г.С. Катастрофические процессы рельефообразования. М.: Изд-во Московского университета, 1998. 102 с.
2. Борисов М.Я., Тропин Н.Ю. Морфометрические особенности южной части Онежского озера // Материалы XVI Всероссийской научной конференции с международным участием «Вузовская наука – региону». Вологда: Изд-во ВоГУ, 2018. 375 с.
3. Воскресенский И.С. Геоморфология карста Юго-восточного Прионежья и вопросы его изучения // Материалы XIV Всероссийской научной конференции «Вузовская наука – региону». Вологда: Изд-во ВоГУ, 2016. С. 373–375.
4. Воскресенский И.С., Сучилин А.А. ГИС геоморфология особо охраняемых природных территорий Юго-восточного Прионежья (в пределах Вологодской области) // Материалы XVI Всероссийской научной конференции с международным участием «Вузовская наука – региону». Вологда: Изд-во ВоГУ, 2018. 375 с.
5. Игнатов Е.И. Береговые морфосистемы. М. – Смоленск: Маджента, 2004. 352 с.

6. Максутова Н.К. Особенности карстовых ландшафтов Волжско-Балтийского водораздела в Вологодской области // Материалы XIV Всероссийской научной конференции «Вузовская наука – региону». Вологда: Изд-во ВоГУ, 2016. С. 380–383.
7. Методика изучения морфологии абразионно-аккумулятивных берегов западного побережья Крыма с применением БЛА и ГНСС (на примере участка территории большого Севастополя) / А.А. Сучилин, Н.И. Белая, И.С. Воскресенский, С.Н. Михеева, В.В. Зорина, Л.А. Ушакова, В.М. Шафоростов, С.А. Сократов // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий». М.: Изд-во МГУ. 2021. Т. 27. Ч. 1. С. 351–363. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-1-27-351-363>.
8. Опасные экзогенные процессы / Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
9. Оценка экологического состояния карстовых озер Волжско-Балтийского водораздела на территории Вологодской области / М.Я. Борисов, И.В. Филоненко, А.С. Комарова, Е.В. Лобуничева, К.Н. Ивичева, Н.Н. Макаренкова, В.Л. Зайцева, А.А. Игнашев // Материалы XIV Всероссийской научной конференции «Вузовская наука – региону». Вологда: Изд-во ВоГУ, 2016. С. 370–372.
10. Павлов Г.Н., Тихонов С.А. О методах изучения карста на территории Вологодской области в практике инженерно-геологических изысканий // Материалы XIV Всероссийской научной конференции «Вузовская наука – региону». Вологда: Изд-во ВоГУ, 2016. С. 386–389.
11. Применение сопряженного анализа для разработки палеогеографического путеводителя: плейстоцен памятника природы «Андомская Гора» (Юго-восточное Прионежье) / И.С. Воскресенский, А.А. Анисимова, И.А. Каревская, Э.Г. Ананьева, А.И. Воскресенский, А.Н. Кичигин // Материалы XIV Всероссийской научной конференции «Вузовская наука – региону». Вологда: Изд-во ВоГУ, 2016. С. 375–378.
12. Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Иванов А.Н. Анализ иерархической структуры рельефа как основы организации природно-территориального комплекса // Вестник МГУ. Серия 5. География. 1997. № 5. С. 3–9.
13. Спиридонов А.И. Основы общей методики полевых геоморфологических исследований и геоморфологического картографирования. М.: Высшая школа, 1970. 456 с.

**L.A. Ushakova<sup>1</sup>, A.A. Suchilin<sup>1</sup>, Z.A. Suchilina<sup>2</sup>, I.S. Voskresensky<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, la.ushakova@mail.ru,  
asuhov308@gmail.com, isvoskresensky@rambler.ru

<sup>2</sup>Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, mezozoya1@mail.ru

## **DEVELOPMENT OF A LOCAL GIS OF SPECIALLY PROTECTED NATURAL AREAS FOR ASSESSING “RISK ZONES” OF HAZARDOUS RELIEF FORMING PROCESSES**

**Abstract.** The research area is located in the southeastern (SE) part of Prionezhye in the Vytegorsky district of the Vologda region of the Russian Federation. The studies were carried out in two complex landscape reserves of the Andoma Upland: Upper-Andomsky and Atleka, which is the watershed of the three largest sea basins in Europe: the Baltic, White Sea and Caspian, as well as within the boundaries of the geological Natural Monument “Andomskaya Gora” (fig. 1) of the Prionezhskaya lowlands, as part of the protected natural complex “Onega”. Risk zone is defined as the degree of probability of manifestation of modern dangerous relief-forming processes. The assessment was carried out for specially protected natural areas (SPNA) located on the Andoma Upland and the Prionezhskaya Lowland of the SE Coast of Lake Onega. The local geographic information system (GIS) includes the main topographic block (relief, hydrology, and others), as well as the thematic blocks «Modern relief-forming processes» and Risk zone in the format of vector and raster maps, tables, with relevant information in the database (DB). The assessment scale risk zone of dangerous modern relief-forming processes (MRP) includes four degrees: low, medium, high and very high. The risk zone of the SPNA of the Verkhne-Andomsky landscape reserve corresponds to the “medium” level. The risk zone of the SPNA Atleka is defined as «medium» and “high”. They are determined by minor changes in the relief of the karst plateau Andoma Uplands, committed by MRP. The dangerous relief-forming process «covered karst» (“Russian karst”) plays a leading role in the MRP parageneses that transform the relief of the secondary glacial plain. The relief of the shore of Lake Onega of the SPNA “Natural Monument of Andomskaya Gora” is intensively destroyed by dangerous MRP. Hazardous MRP have a “very high” and “high” risk area. The leading role is played by abrasion and karst-suffusion process, accompanied by collapse, landslide and gully formation.

**Key words:** GIS; BD; risk zone; dynamics of modern relief-forming processes.

## СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ»

Шполянская Н.А.<sup>1</sup>, Осадчая Г.Г.<sup>1</sup>, Федоров А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ухтинский государственный технический университет, кафедра экологии, землеустройства  
и природопользования, г. Ухта, nellashpol@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск

### КРИОГЕННЫЙ РЕЛЬЕФ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ О ЧЕТВЕРТИЧНОЙ ИСТОРИИ РЕГИОНА

**Аннотация.** Рассматривается криогенный рельеф и формирующие его криогенные процессы Северной Евразии в качестве природного элемента, содержащего в себе информацию о четвертичной истории региона и важного аргумента в неутихающем споре. Криогенный рельеф, формировавшийся в течение всего плейстоцена, и связанный с климатом и особенностями ландшафтной структуры местности, менявшихся во времени от эпохи к эпохе, отражает временной климатический ход и общую палеогеографическую обстановку плейстоцена-голоцен. Пространственные и генетические закономерности криогенного рельефа указывают на то, что 1) два сектора Северной Евразии – западный и восточный – развивались в плейстоцене по-разному: западный в морском режиме, восточный в континентальном, 2) покровного оледенения на равнинах Северной Евразии не было восточнее п-ова Канин.

**Ключевые слова:** криогенный рельеф; криогенные процессы; криолитозона; климат; динамика климата; плейстоцен-голоцен.

#### *Введение*

Спор о четвертичной истории Северной Евразии не утихает многие десятилетия [9] и требует включения новых аргументов. Криогенные процессы, фиксируемые в виде разных форм криогенного рельефа, происходившие на поверхности суши в течение всего плейстоцена, содержат в себе информацию о климатическом ходе и общей меняющейся во времени палеогеографической обстановке, а потому могут быть таким аргументом.

Анализ генетических и пространственных закономерностей криогенного рельефа в трех регионах Северной Евразии – Западной Сибири, Европейской территории России и Восточной Сибири – позволил выявить характер развития региона в четвертичный период, неодинаковый в разных его частях.

#### *Западная Сибирь*

Здесь выделены три основные группы криогенного рельефа [7]: 1 – макроструктурный, предопределенный морозобойным трещинообразованием; 2 – микроструктурный, предопределенный как морозобойными трещинами, так и трещинами усыхания; 3 – аструктурный, не

связанный с трещинообразованием (рис. 1, в). Криогенный рельеф Западной Сибири в своем распространении выявляет заметную зональность, определяемую характером теплового развития горных пород (рис. 1, а). Современное расположение природных зон региона тоже определяется тем же характером теплового развития региона (рис. 1, б). Из карты рис. 1, а видно, что в северной части региона имеет место отрицательный годовой тепловой баланс  $\Delta B$ : зимнее выхолаживание грунтов  $B_x$  преобладает над летним прогревом  $B_t$ . На карте природных зон рис. 1, б эта область соответствует зоне тундры, при этом, вслед за уменьшением с севера на юг отрицательной величины  $\Delta B$  (в изолиниях) происходит и смена зон от *арктической тундры к типичной тундре, и далее к южной тундре*. Среднегодовая температура грунтов меняется от  $-9$  до  $-3^{\circ}\text{C}$  [10].

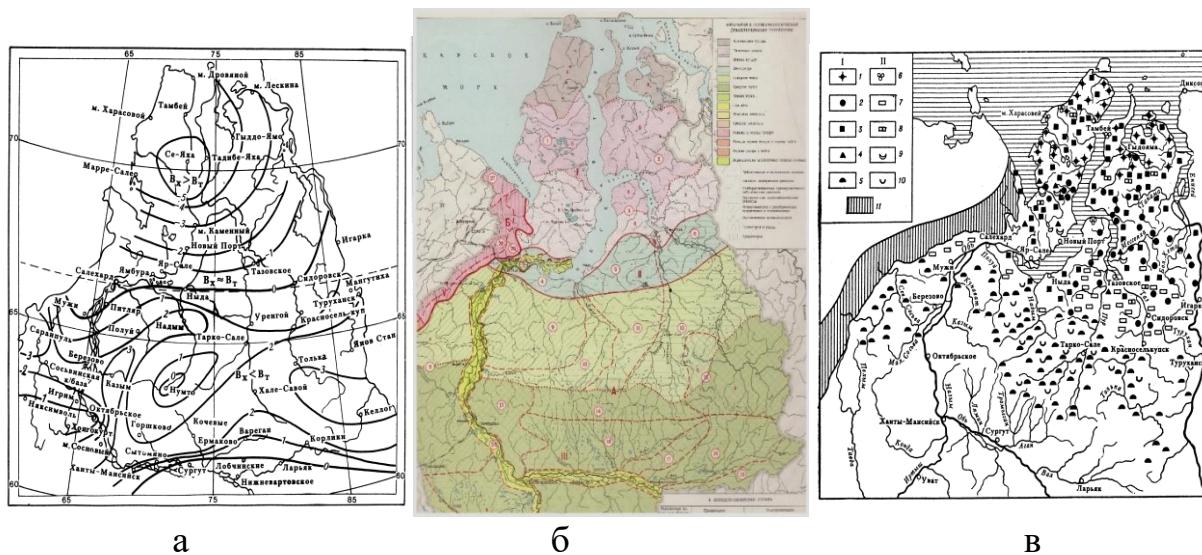


Рис. 1. Тепловые потоки через поверхность (а). *Обозначения:  $B_t$  – поток тепла в грунт в теплый период года,  $B_x$  – отток тепла из грунта в холодный период года, изолинии отражают зональное изменение величины годового теплового баланса – разницы  $\Delta B = B_x - B_t$  ккал/см<sup>2</sup>год [10].* Природные зоны (сверху вниз) (б). *Обозначения: тундра – арктическая, типичная, южная; лесотундра; тайга – северная, средняя [2].* Карта мерзлотного рельефа Западной Сибири [7] (в). *Обозначения: I – формы рельефа восходящего развития: 1 – полигоны валиковые; 2 – полигоны безваликовые; 3 – крупноблочные формы; 4 – бугры напорного пучения; 5 – бугры миграционного пучения; II – формы рельефа нисходящего развития: 6 – байджарахи; 7 – плоскобугристые торфяники; 8 – термокарстовые просадки; 9 – воронки вытаивания ледяного ядра; 10 – воронки и поля проседания; 11 – Уральские горы*

Южнее располагается узкая полоса, где годовой тепловой баланс сводится к нулю, и здесь расположена зона *лесотундры*. Еще южнее располагается зона северной, а потом и средней тайги, совпадающие с областью, где имеет место уже положительный годовой тепловой баланс, и летний приход тепла  $B_t$  преобладает над зимним выхолаживанием  $B_x$ . Тепловой режим этой части региона отражает переход от последнего ледникового периода к голоцену.

Из карт рис. 1, б и в выявляются некоторые особенности развития рельефа.

*Макроструктурный полигональный рельеф* отвечает современной зональности: развит только в зонах тундры и лесотундры, и при этом с севера на юг меняются стадии его развития от полигонально-валикового рельефа с льдами в стадии роста к безваликовым полигонам с льдами в стадии консервации, и к полигональному рельефу стадии деградации – плоскобугристым торфяникам.

Особое место занимает крупноблочный рельеф – полигоны-блоки размером до сотен метров и широкие (десятки метров) межблочья. Он приурочен к наиболее древним высоким водораздельным морским равнинам. В его распространении и стадиях развития не прослеживается современная зональность, он распространен во всех подзонах тундры и в лесотундре. Он явно отражает условия прошлой более холодной эпохи и подтверждает материалы палеогеографов о гиперзональных условиях прошлых холодных эпох.

*Микроструктурный рельеф* – это пятнистые тундры (полигоны 1,5–3,0 м в поперечнике), развит практически во всей области криолитозоны, преимущественно на оголенных участках. Зональность в его распространении практически не проявляется, поскольку он формируется в широком спектре температур, и в большей мере отражает местную природную обстановку.

*Аструктурный рельеф*, представленный формами напорного (севернее ~67°с.ш.) и миграционного (южнее ~67°с.ш.) пучения, в своем распространении отражает современные зональные черты.

Пространственные закономерности криогенного рельефа соответствуют и геоморфологической структуре региона, созданной тектоническими процессами в плейстоцене. Для севера Западной Сибири характерен ступенчатый рельеф [4], сформировавшийся в процессе регрессии моря с начала позднего плейстоцена, когда сверху вниз осушились все более молодые морские равнины [4, 9]. На каждой из них развивались криогенные процессы и рельеф, соответствовавшие очередному климату эпохи. Криогенный рельеф всегда занимает только верхнюю (однослойную) часть геологического разреза, ниже которого непосредственно залегают морские отложения. Это подтверждает существование морского бассейна в течение большей части плейстоцена.

Последнее, что следует отметить, – само развитие полигонального рельефа во все холодные эпохи указывает и на отсутствие в регионе покровного оледенения.

### *Европейский Север России*

На Севере Европейской территории России, в Большеземельской тундре, развиты те же генетические типы рельефа, что и в Западной Сибири. Однако разнообразие форм рельефа здесь меньшее, поскольку регион расположен южнее, и широтная протяженность криолитозоны меньше [6]. Отсутствуют северные широты с резким выхолаживанием грунтов. Присутствуют южная тундра, лесотундра и крайний север северной тайги, и этим зонам соответствуют

зоны сплошной, прерывистой и островной мерзлоты (рис. 2) [5]. В целом регион отличается малоконтрастными условиями: температура мерзлых пород меняется в пространстве всего от 0 до  $-3,5^{\circ}\text{C}$  [3].



Рис. 2. Природные зоны Большеземельской тундры [5]

Как и в Западной Сибири, здесь пространственные закономерности в характере криогенного рельефа отражают меняющиеся в течение четвертичной истории климат и тектонические движения.

Из *макроструктурного рельефа* здесь наиболее широко развит *блочный рельеф*. Это те же, что и в Западной Сибири, наиболее древние плейстоценовые криогенные образования очень крупных размеров (блоки до сотен метров в поперечнике), развитые на поверхности морских равнин-междуречий. Их распространение тоже не подчиняется современной природной зональности, а проявляет только геоморфологическую приуроченность. Это подтверждает, что структура теплообмена грунтов с атмосферой в холодные эпохи плейстоцена была другая – имела место гиперзональность.

Приуроченность к геоморфологической структуре региона, созданной тектоническими движениями в плейстоцене, отражает и подтверждает развитие региона в режиме трансгрессии полярного бассейна и его регрессию с конца среднего – начала позднего плейстоцена, когда осушилась высокая морская равнина ( $\Pi_{2-4}$ ), на которой в условиях все еще холодного климата происходило формирование блочного рельефа. Все последующие осушавшиеся морские равнины ( $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  и  $\Pi_{3-4}$ ) развивались, по-видимому, в недостаточно холодном на этих широтах климате, а потому, в отличие от Западной Сибири, формирование полигонального рельефа с ледяными жилами происходило только на северо-востоке Большеземельской тундры севернее  $67^{\circ}30'$ , и на отдельных участках с аномальными условиями (фрагменты ледяных жил иногда встречаются в плейстоценовых разрезах).

Южное положение региона и его небольшая широтная протяженность усиливает роль местных факторов. Таковыми являются торфяники с их охлаждающей ролью, широко распространенные в регионе. На торфяниках развит современный *полигональный рельеф* с полигонально-жильными льдами, сформировавшимися, как и сами торфяники, в голоцене в зонах южной тундры и лесотундры на плоских междуречьях, на низких водоразделах и на морских и речных террасах [3, 5]. Как результат голоценового потепления формировались плоскобугристые торфяники в зонах южной лесотундры и крайнесеверной тайги.

*Микроструктурный рельеф* представлен «пятнистой тундрой», развит, как и в Западной Сибири, во всех зонах.

*Аструктурный рельеф* представлен в основном *миграционными буграми пучения* с льдистым ядром, наиболее развиты в лесотундре и северной тайге в пределах озерно-аллювиальных и озерно-болотных равнин.

На Европейском Севере России, как и в Западной Сибири, криогенный рельеф развит в верхнем слое геологического разреза каждой из последовательных морских равнин и подстилается непосредственно морскими или лагунными отложениями. Это подтверждает существование большую часть плейстоцена в западном секторе Российского севера морского бассейна.

Сохранившийся до настоящего времени, хотя и редуцированный, но четко прорисованный, крупноблочный рельеф на древней плейстоценовой поверхности указывает еще и на отсутствие здесь покровного оледенения как в среднем плейстоцене, так и во все последующие эпохи.

### *Восточная Сибирь*

Рассматриваемая территория имеет принципиально иной характер природы. Это – регион очень сильного выхолаживания грунтов и приземной атмосферы, имевшего место в течение всего плейстоцена. Широтная смена природных зон здесь существует, но в горном районе, северные ландшафты передвигаются к югу в горы, и это создает однородно холодные условия в регионе. Среднегодовая температура воздуха практически не меняется от зоны к зоне, оставаясь очень низкой ( $-12 \div -15^{\circ}\text{C}$ ) [8].

В таких суровых условиях главным из типов криогенного рельефа оказывается полигональный рельеф с ледяными жилами – *ледовый комплекс*. Он развит на всем пространстве равнин, не считаясь с зональностью (рис. 3, а), и занимает примерно 11% территории Якутии: около 35% ледового комплекса представлены тундровыми ландшафтами, 8% – притундровыми редколесными, 37% – северотаежными и 20% – среднетаежными ландшафтами [8].

В отличие от западных районов Российской Евразии, восточный сектор развивался полностью в континентальных условиях. Рыхлые четвертичные толщи на равнинах – это аллювиальные, озерно-аллювиальные, озерно-болотные образования еще с плиоцена [1]. Морские отложения присутствуют только на северных островах – Новосибирских, Анжу и др.

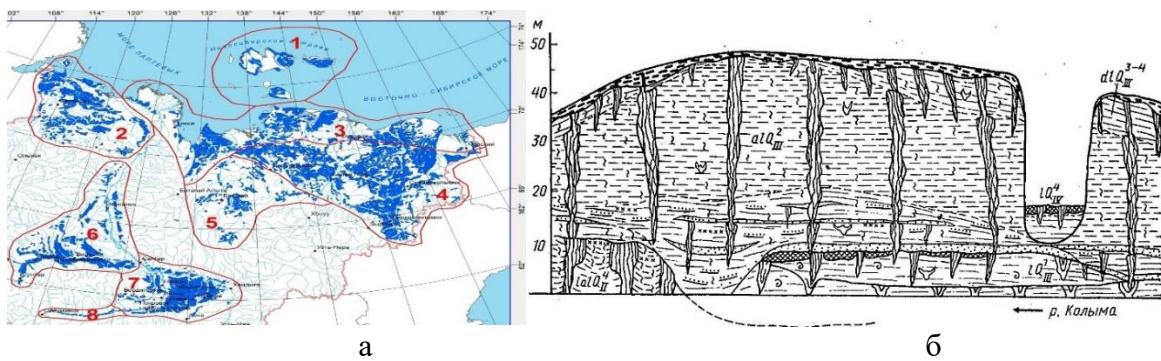


Рис. 3. Распространение ледового комплекса в Якутии (участки синего цвета) [8] (а);  
 обнажение ледового комплекса Дуванный Яр (р. Колыма) [1] (б)

Вследствие постоянно суровых климатических условий в течение каждой эпохи, начиная еще с конца плиоцена, формировался ледовый комплекс, образующий в рельефе того времени едому – поверхность с полигонально-валиковым рельефом с растущими ледяными жилами. Ледовый комплекс каждой эпохи перекрывал едому предыдущей эпохи. Весь разрез четвертичных отложений представлен однотипными комплексами осадков, перекрывающих один другого снизу вверх, с принципиально близким строением (рис. 3, б). Это указывает на однотипность природных условий в регионе в течение всего плейстоцена.

Ряд типов криогенного рельефа в регионе связаны с эпохами потепления, когда несмотря на небольшие изменения температуры из-за очень высокой льдистости активизировались термокарстовые процессы: формировались *аласы* – замкнутые термокарстовые озерные котловины, и *псевдоморфозы по полигонально-жильным льдам* при таянии льда в ледяных жилах.

При новом промерзании водонасыщенных грунтов в застраивающих аласах формировались инъекционные бугры пучения – *булгуняхи*. Одновременно, в днищах аласов, как и на поверхности морских низких террас, дельт и пойм рек – участках преобладающей аккумуляции, происходит формированием нового ледового комплекса. Этот процесс наблюдается и сейчас, например, в пределах Халерчинской тундры в низовьях р. Колымы.

Еще один вывод – формирование во все эпохи плейстоцена ледового комплекса исключает развитие в регионе покровного оледенения.

### Заключение

Из вышеописанного вытекают следующие выводы.

1. Два сектора северной Евразии – западный и восточный – развивались в плейстоцене-голоцене в разных режимах: западный – в условиях морской трансгрессии и морского осадконакопления, восточный – в континентальных условиях и режиме озерно-аллювиального осадконакопления.

2. Покровного оледенения на равнинах Северной Евразии не было ни в одну из эпох плейстоцена. В горах имели место горно-долинное, реже горно-сетчатое, оледенения.

3. В западном секторе в течение плейстоцена-голоцена прослеживались заметные колебания климата и менялся характер теплообмена между атмосферой и породами, обусловливающий меняющийся во времени и пространстве их тепловой режим. В восточном секторе колебания климата были минимальными, и имел место однотипный во времени и пространстве холодный тепловой режим пород в течение всего плейстоцена-голоцена.

4. Набор преобладающих типов криогенного рельефа на равнинах двух секторов Северной Евразии формировался разным: в западном секторе при разнообразных и меняющихся в пространстве и времени условиях (аккумуляции, денудации и стабилизации) развивались практически все формы криогенного рельефа; в восточном секторе, в суровых однородных условиях преобладающей аккумуляции, развиты преимущественно полигональный рельеф с крупными ледяными жилами, просадочные термокарстовые формы (аласы) и формы напорного пучения (булгунняхи).

5. В западном секторе, где четко проявляется природная зональность, в криогенном рельефе наблюдается увеличение форм нисходящего развития с севера на юг. В восточном секторе такой закономерности не прослеживается. Формы нисходящего развития, например, байджарахи, образуются на любой широте под влиянием местных условий, как правило, при разрушении ледового комплекса в открытых береговых обнажениях. На всей территории региона в целом сохраняется активность развития полигонального рельефа.

### Список литературы

1. Архангелов А.А., Конищев В.Н., Розенбаум Г.Э. Приморско-Новосибирский криолитологический район // Региональная криолитология. М.: Изд-во Московского университета, 1989. С. 128–151.
2. Гвоздецкий Н.А., Криволуцкий А.Е., Макунина А.А. Карта физико-географического районирования М 1:6 000 000 // Атлас Тюменской области. М. – Тюмень: Изд-во ГУГК, 1971. Вып. 1. Лист 27.
3. Конищев В.Н., Тумель Н.В. Малоземельско–Большеземельский район // Региональная криолитология / Под ред. А.И. Попова. М.: Изд-во Московского университета, 1989. С. 24–48.
4. Лазуков Г.И. Геоморфологическая карта Тюменской области М 1:4 000 000 // Атлас Тюменской области. М. – Тюмень: Изд-во ГУГК – МГУ, 1971. Вып. 1. Лист 10.
5. Осадчая Г.Г. Торфяники криолитозоны европейского северо-востока: зональные особенности развития // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике» / Под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова. Салехард, 2021. С. 327–330.

6. Осадчая Г.Г., Шполянская Н.А. Географические особенности изменчивости геокриологических характеристик Большеземельской тундры // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 2(104). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.2.024>.
7. Попов А.И. Карта мерзлотного рельефа М 1:6 000 000 // Атлас Тюменской области. М. – Тюмень: Изд-во ГУГК, 1971. Вып. 1. Лист 15.
8. Федоров А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов Якутии. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 2020. 40 с.
9. Шполянская Н.А. Спорные вопросы четвертичной истории Российской Арктики в материалах по криолитозоне // Инженерная геология. 2022. Т. XVII. № 4. С. 30–42. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2022-17-4-52-64>.
10. Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Дудников В.Ю. Динамика глобального изменения климата и эволюция криолитозоны. М.: Юрайт, 2021. 294 с.

**N.A. Shpolyanskaya<sup>1</sup>, G.G. Osadchaya<sup>1</sup>, A.N. Fedorov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ukhta State Technical University, Ukhta, nellashpol@yandex.ru

<sup>2</sup>Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk

## **CRYOGENIC RELIEF OF NORTHERN EURASIA AS A SOURCE OF INFORMATION ABOUT THE QUATERNARY HISTORY OF THE REGION**

**Abstract.** This article examines the cryogenic relief and the cryogenic processes forming it in Northern Eurasia as a natural element containing information about the Quaternary history of the region and an important argument in an ongoing dispute. The cryogenic relief formed during the entire Pleistocene, and associated with the climate and features of the landscape structure of the area, which changed over time from epoch to epoch, reflects the temporal climatic course and the general paleogeographic situation of the Pleistocene-Holocene. Spatial and genetic patterns of the observed cryogenic relief indicate that 1) two sectors of Northern Eurasia – western and eastern – developed differently in the Pleistocene: western in the marine regime, eastern in the continental, 2) there was no cover glaciation on the plains of Northern Eurasia east of the Kanin Peninsula.

**Key words:** cryogenic relief; cryogenic processes; cryolithozone; climate; climate dynamics; Pleistocene-Holocene.

**Самохвалов Н.Д.<sup>1</sup>, Васильев А.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии,  
г. Москва, samohvalovnd@my.msu.ru

<sup>2</sup>Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень

## **ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЗОННО-ТАЛОГО СЛОЯ В ТИПИЧНОЙ ТУНДРЕ ЗАПАДНОГО ЯМАЛА**

**Аннотация.** В публикации представлены результаты многолетних полевых наблюдений за динамикой сезонного протаивания на площадке CALM R3, расположенной в доминантных ландшафтах типичной тундры Западного Ямала. За период наблюдения были получены значения средней глубины оттаивания, изучена динамика мощности сезонно-тального слоя в зависимости от типа ландшафта, изучен внутрисезонный ход протаивания, проведены термометрические замеры в пределах глубины его развития.

**Ключевые слова:** сезонно-тальный слой; температурный режим; Западная Сибирь; Ямал.

Сезонно-тальный слой (СТС) является индикатором климатических изменений в криолитозоне, это связано с тем, что ежегодная глубина оттаивания, под влиянием природных факторов, может иметь разнонаправленные тренды, от года к году то возрастая, то сокращаясь [1]. Наблюдения за глубиной СТС проводятся в доминантных ландшафтах типичной тундры с 1978 г. В 1995 г. была предложена программа CALM, которая посвящена изучению динамики СТС в различных регионах криолитозоны. Методика CALM подразумевает механическое зондирование глубины СТС металлическим щупом. Время зондирования варьируется, начиная с середины августа до середины сентября, когда глубина оттаивания близка к своему максимуму. Программа CALM является достаточно репрезентативным способом наблюдением за СТС [2]. Измерения, сделанные по единой методике, позволяют сравнивать данные с другими площадками. В ходе проведенных полевых работ на площадке CALM R3 в августе 2022 г. были получены значения средней глубины оттаивания для пяти типов ландшафтов: полигональная влажная тундра, дренированная тундра, дренированный песчаный раздув, торфяник и болото (рис. 1). Наименьшая динамика оттаивания характерна для болотных ландшафтов, застойный водный режим которых способствует большей льдистости грунтов СТС. Также в пределах болотных понижений наблюдается, как правило, повышенная аккумуляция снега, препятствующая проникновению тепла в летний период. Наибольшее увеличение мощности СТС наблюдается в дренированном песчаном раздуве за период с 1975 по 2022 гг., он составил 49 см на глубинах от 126 до 175 см. Меньшая дисперсность и малая льдистость грунтов песчаного раздува способствует наибольшим темпам протаивания.

В полигональных влажных тундрах изменение средней глубины протаивания с 1995 по 2022 гг. составило 21 см на глубинах от 76 до 97 см. При потеплении климата происходит иссушение заболоченных участков тундры. Уменьшение влажности грунта ведет к меньшему его тепловому сопротивлению,

что способствует увеличению глубины протаивания. В дренированных тундрах тренд на увеличение средней глубины СТС так же идет на увеличение глубины протаивания. За промежуток с 1978 по 2022 гг. увеличение средней мощности СТС составляет 26 см на глубинах от 115 до 141 см.

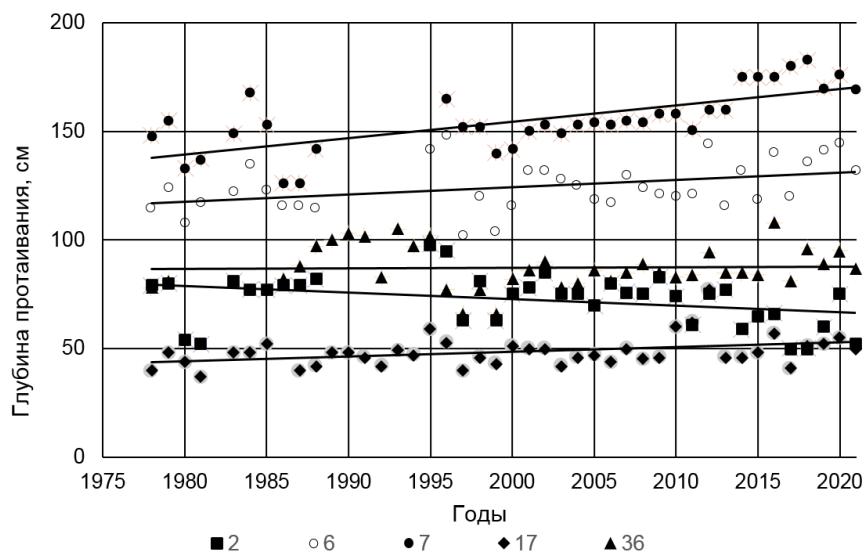


Рис. 1. Динамика глубины протаивания в основных ландшафтах на площадке CALM R3 за период 1978–2021 гг. Обозначения: 2 – полигональная влажная тундра, 6 – дренированная тундра, 7-дренированный песчаный раздув, 17 – торфяник, 36 – болото

Дополнительно влияние климатических изменений можно проследить, анализируя внутрисезонную динамику СТС. На примере дренированных тундр (рис. 2) глубина протаивания в определенный момент времени отнесена к максимальному значению за весь период протаивания.

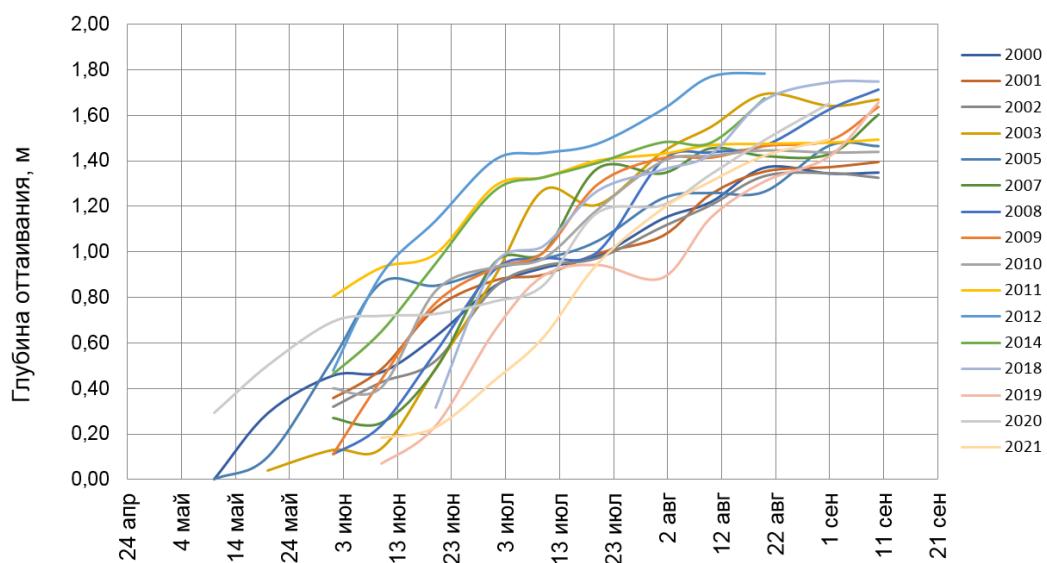


Рис. 2. Внутрисезонная динамика нулевой изотермы в дренированных тундрах CALM R3 за период 2000–2021 гг.

Временную динамику СТС определяет температура воздуха: протаивание начинается при сходе снега и установлении положительных среднесуточных температур воздуха, достигая максимальных глубин к концу сезона протаивания. Скорость протаивания максимальна в период с мая по начало июля, далее интенсивность уменьшается до начала августа и после увеличивается незначительно и близка к стагнации.

Сравнение многолетних изменений средневзвешенных значений глубины пропаивания и данных наблюдений на площадке CALM показало, что многолетние тренды изменения глубины СТС примерно одинаковы, а данные по площадке CALM репрезентативны для типичной тундры.

### Список литературы

1. Широков Р.С. Оценка динамики геоэкологических условий прибрежно-морской области Западного Ямала при изменении климата: дис. ... канд. геогр. наук. М.: Государственный университет по землеустройству, 2021. 151 с.
2. Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: research designs and initial results // Polar Geography. 2000. Vol. 24. No. 3. P. 166–258.

**N.D. Samokhvalov<sup>1</sup>, A.A. Vasiliev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, samohvalovnd@my.msu.ru

<sup>2</sup>Institute of the Earth Cryosphere, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tyumen

## STUDIES OF THE ACTIVE LAYER IN THE TYPICAL TUNDRA OF WESTERN YAMAL

**Abstract.** This paper analyzes results of long-term observations of the dynamics of seasonal thawing in the dominant landscapes of typical tundra at the CALM R3 site. We obtained the values of the average thawing depth, studied the dynamics of thawing depending on the type of landscape and intra-season progress of active layer.

**Key words:** active layer; thermal regime of permafrost; Western Siberia; Yamal.

## СЕКЦИЯ «ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ»

С.А. Перетокин<sup>1,2</sup>, А.Д. Завьялов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, zavyalov@ifz.ru

<sup>2</sup>Красноярский филиал ФГБУ «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий», г. Красноярск, saperetokin@yandex.ru

### О НЕОБХОДИМОСТИ МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ

**Аннотация.** Стандарты для проведения процедуры вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) отсутствуют. В публикации представлено видение авторов по проблеме методических рекомендаций при выполнении ВАСО в составе комплекса инженерно-геологических изысканий. Авторы полагают, что такой методический документ должен содержать общий алгоритм методики ВАСО, включая все этапы подготовки входной информации. При этом каждый этап методики ВАСО должен быть описан отдельной главой, содержащей исчерпывающие рекомендации по его выполнению. Должен быть перечислен полный перечень параметров, которые можно получить на основе ВАСО для заданной вероятности превышения интенсивности сейсмических сотрясений в течение срока эксплуатации проектируемого объекта, из которого проектировщик будет выбирать необходимый набор для расчета сейсмических нагрузок, и указывать его в техническом задании на проведение инженерно-геологических изысканий.

**Ключевые слова:** сейсмическая опасность; вероятностный анализ; инженерно-геологические изыскания; нормативная техническая документация; методические рекомендации.

В настоящее время на вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО), так или иначе, ориентируется большинство нормативных технических документов (НТД), регламентирующих проведение инженерно-геологических изысканий и проектирование в сейсмически активных районах [1–4]. При этом, в отечественных НТД не описаны методические основы и не даны пошаговые рекомендации по выполнению ВАСО. Положения соответствующих сводов правил должны содержать четкие рекомендации, а не общие описательные тезисы на тему выполняемых работ.

Не имея альтернативы, изыскатели выполняют данный вид работ в меру своего понимания задачи, либо заказывают его научным организациям. Однако специалисты научных организаций, не всегда понимают задачи и место ВАСО в комплексе инженерно-геологических изысканий для проектирования. При этом, при отсутствии стандартов ВАСО, у различных специалистов научных организаций существенно различаются представления о том, как этот вид изысканий следует выполнять. В результате сотрудники ФАУ «Главгосэкспертиза России» принимают результаты, опираясь на опыт своих экспертов или заключения научных организаций.

ВАСО требует выполнение конкретной вычислительной процедуры, позволяющей учесть влияние на проектируемый объект всех сейсмически активных структур региона, сейсмический режим территории, особенности затухания сейсмических воздействий с удалением от очага землетрясений.

Однако, зачастую при выполнении инженерно-геологических изысканий происходит подмена понятий. Сейсмическая опасность оценивается как уровень сейсмических воздействий от наиболее вероятного землетрясения (или нескольких таких землетрясений) с конкретной магнитудой и расстоянием до объекта. Но такой подход не является вероятностной оценкой сейсмической опасности, а представляет собой метод сценарных землетрясений.

Очевидно, что для исключения манипуляций и обеспечения достоверных оценок сейсмической опасности необходимы методические рекомендации по выполнению ВАСО, имеющие статус нормативных. Следует отметить, что регламентировать методику проведения комплекса работ по подготовки входных моделей и проведения расчетов задача вполне решаемая. Это могут быть отдельные, унифицированные методические рекомендации, на которые будут ссылаться остальные НТД, использующие вероятностные оценки сейсмической опасности.

Документ должен содержать общий алгоритм методики ВАСО, включая все этапы подготовки входной информации. Каждый этап методики ВАСО должен быть описан отдельной главой, содержащей исчерпывающие рекомендации по его выполнению.

Должен быть перечислен весь перечень параметров, которые можно получить на основе ВАСО для заданной вероятности превышения интенсивности сейсмических сотрясений в течение срока эксплуатации проектируемого объекта, например: интенсивность сотрясений, пиковые ускорения, скорости и смещения движения грунта, длительность колебаний, обобщенный спектр реакции, деагрегация сейсмической опасности. Из этого перечня параметров проектировщик выбирает необходимый набор для расчета сейсмических нагрузок, и указывает его в техническом задании на проведение инженерно-геологических изысканий.

## Список литературы

1. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах.
2. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства.
3. СП 286.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования.
4. СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.

**S.A. Peretokin<sup>1,2</sup>, A.D. Zavyalov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, zavyalov@ifz.ru

<sup>2</sup>Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies,  
Krasnoyarsk, saperetokin@yandex.ru

## **ON THE NEED FOR METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR THE PERFORMANCE OF PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSES AS PART OF ENGINEERING SURVEYS**

**Abstract.** There are no standards for the procedure of probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). The report presents the authors' vision of the problem of methodological recommendations for performing PSHA as part of the complex of engineering-geological surveys. The authors believe that such a methodological document should contain a general algorithm of PSHA methodology, including all stages of preparation of input information. At the same time, each stage of the PSHA methodology should be described in a separate chapter with comprehensive recommendations for its implementation. A complete list of parameters that can be obtained on the basis of PSHA for a given probability of exceeding the intensity of seismic shaking during the lifetime of the designed object should be listed, from which the designer will select the necessary set for calculation of seismic loads and specify it in the terms of reference for engineering-geological surveys.

**Key words:** seismic hazard; probabilistic analysis; engineering surveys; normative and technical documentation; methodological recommendations.

**Смирнов И.Д.<sup>1,2</sup>, Чуркин А.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ “Строительство», г. Москва, smirnov.ya-igor1999@yandex.ru  
<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, г. Москва

## **ПРИМЕНЕНИЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ОБСЛЕДОВАНИИ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Аннотация.** На этапах контроля качества и обследования состояния монолитных плитоподобных конструкций применяются неразрушающие геофизические методы. Комплекс из низкочастотного и высокочастотного георадиолокационного профилирования и сейсмоакустических наблюдений позволяет дать общую оценку однородности материала конструкции и состояния ее контакта с вмещающим грунтом. Методика анализа атрибутов нормированного отклика активно развивается отечественными специалистами в области применения методов технической геофизики. Важным вопросом практики применения методики является выработка автоматизированных критериев выделения аномальных участков объекта исследования. Повышение достоверности выводов о состоянии конструкции предполагается достичь за счет вспомогательных приемов анализа данных из области машинного обучения. На примере обследования фундаментных плит показаны некоторые особенности применения кластерного анализа для локализации областей нарушения контакта «плита–грунт».

**Ключевые слова:** техническая геофизика; акустические методы; плитоподобные конструкции; атрибутный анализ; кластерный анализ.

Рост объемов применения методов технической геофизики при неразрушающем контроле качества геотехнических конструкций требует формализации и стандартизации подходов к сбору, обработке и анализу данных. Фундаментные плиты и другие плитоподобные конструкции исследуются с помощью площадной сейсмоакустической и георадиолокационной съемки [1, 3–6]. При анализе построенных на этапе обработки карт изменения динамических параметров сигналов встает вопрос о разделении аномальных и не аномальных участков конструкции. Предлагается адаптировать для повышения достоверности выделения аномалий процедуры кластерного анализа, опыт применения которых для решения геофизических задач доступен для изучения [2, 7, 8].

Основа и акустического, и электромагнитного обследования состоит в покрытии плитоподобной конструкции сетью равномерно распределенных точек или профилей наблюдений. По результатам геофизической съемки интерпретатор получает для анализа массив данных, имеющий пространственную привязку и включающий набор атрибутов, в разной степени чувствительных к аномалиям и особенностям различной природы.

Далее, при выделении аномалий, как правило пользуются грубым статистическим критерием «трех сигм», применяя его для наиболее чувствительного к пустотам и зонам разуплотнения атрибуту [6]. Важным этапом является определение набора наиболее информативных атрибутов. Удобным инструментом для этого может являться построение попарных

диаграмм рассеяния и гистограмм распределений атрибутов (рис. 1). Показанные на рис. 1 выборки атрибутов были получены при обследовании плиты, результаты которого подробнее рассматриваются в [4].

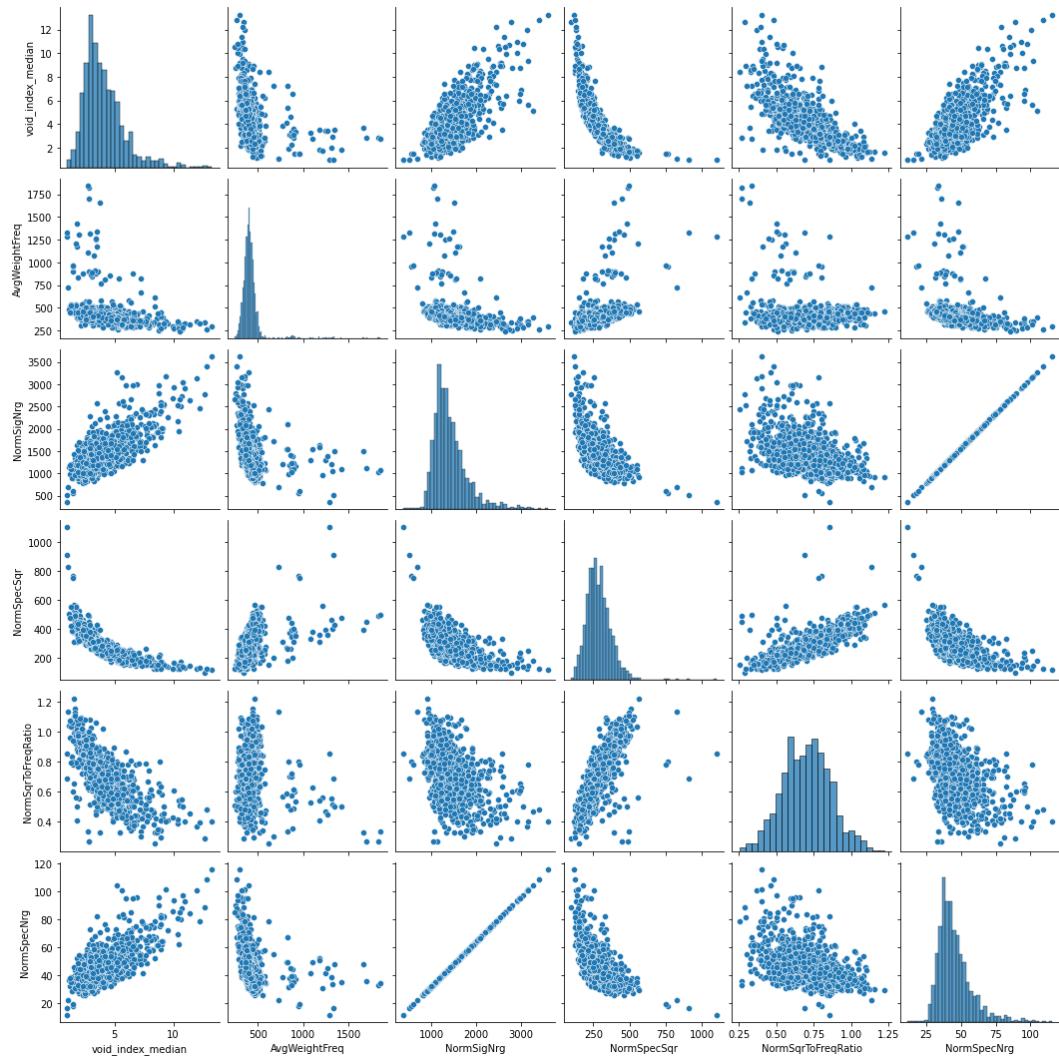


Рис. 1. Корреляционные диаграммы различных атрибутов, рассчитываемых по результатам сейсмоакустического обследования конструкции

Из данного набора атрибутов в качестве наиболее информативных были выбраны «индекс пустот» и «энергия нормированного сигнала». Были построены карты в цветовой шкале «трех сигм». Затем для получения альтернативной оценки аномальных точек наблюдений применен алгоритм иерархической кластеризации на выбранных атрибутах. Количество кластеров было задано заранее и ограничено двумя критериями: «хороший контакт» и «плохой контакт». На рис. 2 приведено сравнение карт, полученных ручным и автоматическим способом. Как видно, результат кластеризации позволил указать на большее количество аномальных областей. Визуальная проверка показала, что с помощью процедуры был корректно выделен дополнительный аномальный участок в верхнем правом углу карты.

Процедура кластеризации требует аккуратного использования и понимания концепции используемого алгоритма. Существует большое количество различных алгоритмов кластеризации, все имеют свои преимущества и недостатки. Одним из перспективных направлений является использование кластеризации с «частичным привлечением учителя», когда алгоритму в явном виде задаются аномальные точки. Применительно к акустическому обследованию плит эти точки могут быть выбраны по заверке бурением. Также это могут быть точки, сигналы для которых эксперт однозначно может определить как аномальные.

Таким образом, подбор информативного комплекта атрибутов и последующее их ранжирование с применением автоматизированных методик обработки, вроде кластерного анализа, может стать полезным подспорьем для рационализации работы геофизика-интерпретатора.

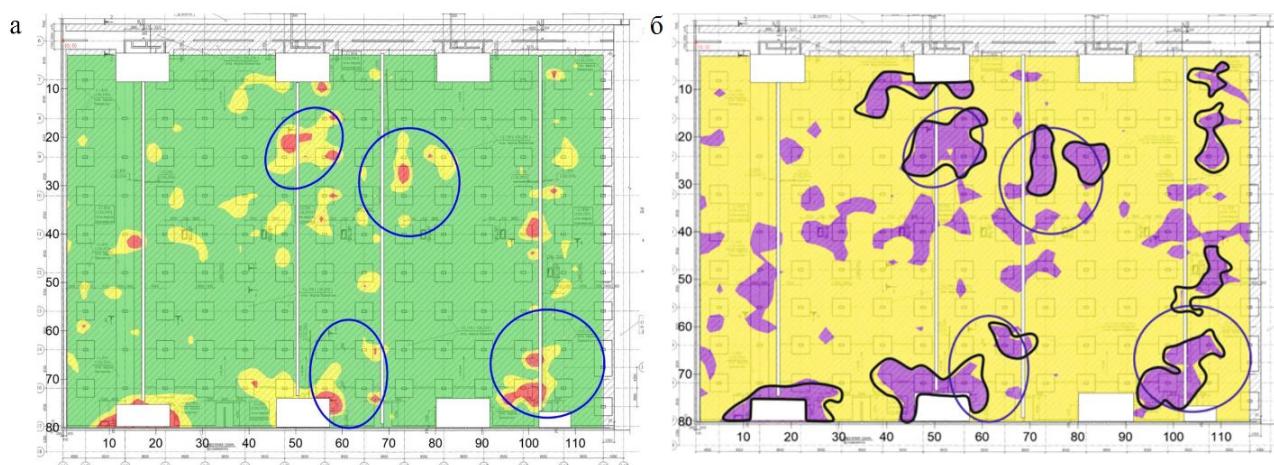


Рис. 2. Сравнение карт аномальных участков конструкции: а – построенной с применением критерия «трех сигма» для атрибута «энергии нормированного сигнала», б – построенной с применением иерархической кластеризации с использованием пары атрибутов «индекс пустот» и «энергия нормированного сигнала» (желтый цвет соответствует хорошему контакту, фиолетовый – нарушенному)

## Список литературы

1. Капустин В.В., Владов М.Л. Техническая геофизика. Методы и задачи // Геотехника. 2020. Т. XII. № 4. С. 72–85. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85>.
2. Набатов В.В., Уткина А.В. Специфика изменчивости признаков зарегистрированных сигналов при георадиолокационном выявлении полостей в массиве пород на границе «обделка–грунт» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 7. С. 52–63.
3. Чуркин А.А., 2022. Некоторые вопросы интерпретации результатов акустического обследования геотехнических конструкций // Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки

изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: ООО «Геомаркетинг», 2022. С. 297–301.

4. Чуркин А.А., Смирнов И.Д. Развитие методики анализа нормированного акустического отклика для оценки контакта конструкция–грунт // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 3. С. 32–47.
5. Чуркин А.А., Смирнов И.Д., Широбоков М.П. Геофизический комплекс экспресс-диагностики состояния фундаментных плит // Фундаменты. 2023. № 3. С. 43–47.
6. Чуркин А.А., Хмельницкий А.Ю., Капустин В.В. Оценка условий контакта конструкций с грунтовым массивом по атрибутам нормированного акустического отклика // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2022. № 5. С. 17–21.
7. Assessment of defects under insulation using k-medoids clustering algorithm-based microwave nondestructive testing / S.Y. Tan, M.F. Akbar, N.H.M.M. Shrifan, G. Nihad Jawad, M.N. Ab Wahab // Coatings. 2022. Vol. 12. ID 1440.
8. Völker C., Shokouhi P. Multi sensor data fusion approach for automatic honeycomb detection in concrete // NDT and E International. 2015. Vol. 71. P. 54–60.

**I.D. Smirnov<sup>1,2</sup>, A.A. Churkin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC, Moscow, smirnov.ya-igor1999@yandex.ru

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow

## **APPLICATION OF CLUSTER ANALYSIS TO IDENTIFY ANOMALIES DURING ACOUSTIC INSPECTION OF MONOLITHIC STRUCTURES**

**Abstract.** At the stages of quality control and condition's inspection of monolithic plate-like structures non-destructive geophysical methods are widely used. A complex of low-frequency and high-frequency ground penetrating radar profiling and seismoacoustic observations allows us to give a general assessment of the structure's material integrity and the state of its contact with the surrounding soil. The technique of analyzing the attributes of a normalized response is being actively developed by Russian specialists in the field of technical geophysics' application. An important issue in the practice of applying the technique is the development of automated criteria for identifying anomalous areas of the research object. Increasing the reliability of conclusions about the state of the structure is expected to be achieved through auxiliary data analysis techniques from the field of machine learning. Using the example of examining foundation slabs, some features of using cluster analysis to localize areas of slab-soil contact failure are shown.

**Key words:** technical geophysics; impulse response testing; plate-like structures; attribute analysis; cluster analysis.

## СЕКЦИЯ «ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ»

**Мошин В.Е., Филимонова Е.А., Поздняков С.П.**

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, г. Москва, moshin\_v@mail.ru

### ГЕОСТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

**Аннотация.** Приведен анализ влияния пространственной геофiltрационной неоднородности на результаты интерпретации опытных откачек на примере готерив-барремского водоносного пласта Симферопольского месторождения подземных вод. Сравнение приводится по имитации 12-ти дневной откачки из центральной скважины. Неоднородность задается геостатистическим моделированием исследуемой территории. Построено десять равновероятных реализаций геологического пространства методом последовательного индикаторного кригинга по трем категориям выделенных отложений – «хорошо», «средне» и «плохо» проницаемых. Установлено влияние фильтрационной неоднородности на величину удельного дебита центральной скважины: при одинаковых внешних условиях без учета скин-эффекта, разброс удельных дебитов относительно однородной модели составляет от 3,5 до 46,5%.

**Ключевые слова:** коэффициент фильтрации; геофiltрационное моделирование; геостатистическое моделирование; вертикальная фильтрационная неоднородность.

В гидрогеологических исследованиях опытно-фильтрационные работы (ОФР) являются неотъемлемой задачей при определении геофiltрационных параметров исследуемого водоносного пласта, а от интерпретации выполненных полевых работ непосредственно зависит оценка эксплуатационных запасов участка недр [2]. При обработке кустовых откачек по аналитическим зависимостям в разных наблюдательных скважинах получаются различные значения кажущейся проводимости, т.е. проводимости, полученной с использованием аналитической модели однородного в плане пласта. При использовании моделирования для обработки данных таких откачек путем создания плановой геофiltрационной модели часто используется зонная модель неоднородности проводимости, не обращая внимание на то, что фильтрационная неоднородность может быть трехмерной, плохо описываемой плановой зональностью.

Исследуемым участком работ являлся водозаборный узел, приуроченный к Симферопольскому месторождению подземных вод. На его территории пробурено десять скважин общей площадью 2 км<sup>2</sup>. В этих скважинах проведены ОФР, включающие в себя как одиночные и кустовые, так и групповую откачки из напорного водоносного горизонта готерив-барремских отложений нижнемеловой системы. Интерпретация откачек проводилась по схеме

изолированного однородного неограниченного в плане водоносного пласта, в случае групповой откачки – по методу группового асинхронного возмущения для той же геофильтрационной схемы [4]. Как видно из приведенной диаграммы результатов ОФР (рис. 1), различие проводимостей целевого горизонта составляет до одного порядка, что, вероятно, связано с его литологической неоднородностью. По проведенным геофизическим исследованиям, интерпретируемым по буровой скважине с отбором керна, было выделено семь различных литологических разностей на площади участка, при этом на территории всего Симферопольского месторождения подземных вод целевой водоносный горизонт характеризуется 13 литологическими разностями, что еще раз подтверждает необходимость исследования пространственной геофильтрационной неоднородности.

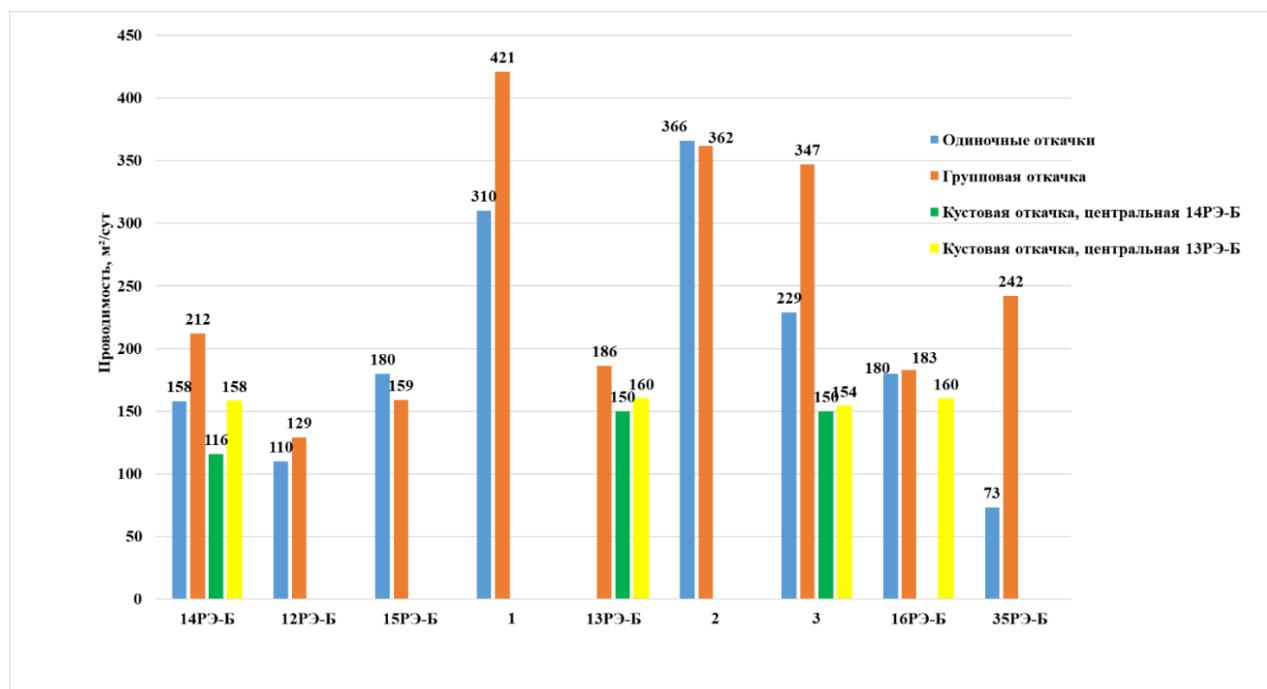


Рис. 1. Результаты обработки опытно-фильтрационных работ

Целью данной работы является анализ влияния пространственной геофильтрационной неоднородности на результаты интерпретации опытных откачек на примере готерив-барремского водоносного пласта Симферопольского месторождения подземных вод.

Для достижения поставленной цели был поставлены следующие задачи:

- анализ литологической неоднородности и построение ее трехмерной геостатистической модели;
- разработка методики имитации опытной откачки и проведение численных экспериментов;
- обработка результатов численных экспериментов.

Геостатистическое моделирование литологических фаций широко используется для обоснования гидрогидродинамических моделей нефтяных месторождений [6], однако оно до сих пор не слишком распространено в работах по оценке запасов подземных вод. Геостатистический инструментарий, включающий вариограммный анализ и условное моделирование [6], может эффективно использоваться для количественной оценки влияния геофильтрационной неоднородности на результаты ОФР и последующему анализу неопределенности прогнозов работы водозаборов.

На первом этапе исследования (задача «а») был проведен литолого-фациальный анализ отложений по данным буровых журналов, паспортов и геофизических исследований в скважинах.

Литологический разрез каждой скважины, вскрывающей готерив-барремский водоносный горизонт на территории Симферопольского месторождения подземных вод, был разделен на блоки с вертикальной дискретизацией в 1 м с дальнейшим распределением на три основные фациальные группы. Так, в группу «хорошо» проницаемых были включены следующие отложения: галька и гравий; песок крупнозернистый; песчаник; известняк. В «средне» проницаемые: мелко-, среднезернистый песок; тонкозернистый песок; глинистый песок; гравелит; конгломерат. В «плохо» проницаемые: песчаник глинистый; аргиллит; алевролит; глина. Отнесение того или иного типа отложений к одной из фациальных групп связано с фильтрационными свойствами, их оценка проведена по справочным данным [3]. Процентное распределение фациальных групп следующее: «хорошо» проницаемые – 48%, «средне» проницаемые – 38%, а «плохо» проницаемые – 14%.

Для вариограммного анализа и геостатистического моделирования использовалось программное обеспечение SGeMS. Для моделирования выбран последовательный индикаторный алгоритм SISIM [7]. В этом методе данные преобразуются в индикаторные переменные, на этапе вариограммного анализа подбираются индикаторные вариограммы, зависящие в общем случае от расстояния и от направления, а затем проводится условное индикаторное моделирование 3D-распределения выделенных фаций. Таким образом, можно получить заданное количество равновероятных реализаций геологического пространства, которые обусловлены имеющимися фактическими данными.

На этапе вариограммного анализа экспериментальная вариограммная модель была подобрана для каждой из трех фациальных групп. Вариограммы рассматривались в трех ортогональных направлениях. Выяснилось, что для вертикального направления вариограммы корреляционный радиус составил от 70 до 200 м в зависимости от категорий фаций, а в плане радиусы эллипсоида корреляций были примерно одинаковыми и составили от 650 до 900 м для различных категорий фаций. Полученные таким образом экспериментальные вариограммы были аппроксимированы теоретической экспоненциальной моделью с вертикальной анизотропией. Затем с использованием полученных вариограмм и SISIM метода было создано десять трехмерных равновероятных

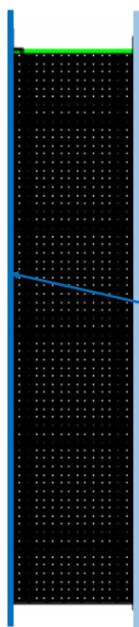
моделей распределения фаций в пространстве на участке работ общей площадью 2 км<sup>2</sup>. Для перехода от фациальных моделей к моделям геофильтрационной неоднородности коэффициент фильтрации каждой из трех фаций был задан константой, оцененной по фактическим опытным данным. Для этой оценки использовались мощности каждой фаций, а также значение проводимости по трем эксплуатационным скважинам с наибольшим количеством ОФР, включающих кустовые и групповую откачки. С использованием этих данных по простейшей слоистой схеме строения была дана оценка следующих коэффициентов фильтрации: для «хорошо» проницаемых – 1,40 м/сут, для «средне» проницаемых – 0,10 м/сут, для «плохо» проницаемых – 0,01 м/сут.

Следующим этапом исследования (задача «б») являлась разработка методики имитации опытной откачки и проведение численных экспериментов. Для каждой модели геофильтрационной неоднородности были созданы синтетические геофильтрационные модели, воспроизводящие одинаковые внешние условия на площади участка работ, с целью имитации 12-ти дневной опытной откачки. При этом размер блока ортогональной сетки в плане составил 10×10 м, количество слоев в модели – 320, а мощность каждого – 1 м (рис. 2). Восточная граница модели – граница второго рода, на которую был задан удельный расход (см. рис. 2), равный питанию, приходящему на границу участка работ, который получен по архивным данным. Западная часть модели задавалась как граница третьего рода (см. рис. 2), реализованная в MODFLOW – шестым пакетом GHB (general head boundary) [5], которая требует задания понижения на внешней границе и параметра проводимости  $T_{ghb}$ . Для задания этих расчетных параметров предполагается, что внешняя граница расположена на расстоянии, равном радиусу влияния откачки [1]  $R_{ghb} = 3\sqrt{at_p}$ , а понижение на ней равно нулю. Значение  $T_{ghb}$  в каждом граничном блоке, расположенном на расстоянии  $R_b$  от центральной скважины, рассчитывалось исходя из того, что доля общего расхода потока, формирующегося за счет реализации упругой емкости, экспоненциально падает с расстоянием [1]. Это ведет к следующему выражению для  $T_{ghb}$  [2]:

$$T_{ghb} = \frac{\Delta l_p \cdot T_G}{R_b \cdot \ln \frac{R_{ghb}}{R_b}} \cdot \exp \left( \frac{R_b}{4at_p} \right),$$

где  $\Delta l_p$  – ширина граничного блока, м;  $T_G$  – среднегеометрическое значение проводимости, м<sup>2</sup>/сут;  $t_p$  – продолжительность откачки, сут;  $a$  – пьезопроводность, м<sup>2</sup>/сут.

Кроме того, была создана одна однородная модель с аналогичными граничными условиями и пространственной дискретизацией, но с постоянным коэффициентом фильтрации, равным 0,5 м/сут. Это значение коэффициента фильтрации оценено по тем же данным, что и для трех фаций, но при предположении о постоянстве коэффициента фильтрации по вертикали.



- Дискретизация сетки в плане: 10 м;
- Количество слоев в модели: 320, мощность каждого - 1 м;
- Границные условия:
  - граница II рода на восточной части участка
  - граница III рода на западной части участка

Рис. 2. Геофiltрационная схематизация модели

Для десяти описанных выше равновероятных реализаций геофiltрационной неоднородности и однородной модели были проведены численные эксперименты, имитирующие 12-суточную откачку.

Последним этапом (задача «в») являлась обработка полученных результатов численного моделирования откачки. Для оценки кажущейся проводимости для всех экспериментов был выбран один и тот же квазистационарный участок, а интерпретация проводилась по схеме однородного изолированного неограниченного в плане пласта. Результаты моделирования, представленные графиками временного прослеживания по центральной скважине № 2 (рис. 3) показывают, что при одном и том же статистическом распределении значений коэффициента фильтрации ход понижения напора при откачке может быть достаточно разнообразен.

Конкретная конфигурация элементов трехмерной геофiltрационной неоднородности, полученная геостатистическим моделированием, который обусловлен одними и теми же фактическими данными, существенно влияет на динамику снижения напоров в имитационной откачке. Из результатов моделирования следует, что для одинаковых внешних условий без влияния скин-эффекта, но при различном распределении в пространстве «хорошо», «средне» и «плохо» проницаемых блоков, удельный дебит центральной скважины изменяется от 1,84 до 3,58 л/(с·м), в то время как для однородной модели удельный дебит составляет 2,79 л/(с·м). Наблюдается существенный разброс значений понижений на конец откачки и величин кажущихся проводимостей (рис. 4), полученных по одному и тому же квазистационарному участку (см. рис. 3). Отношение интерпретированных модельных проводимостей каждой реализации  $T_2'$  к модельному постоянному значению  $T_2$  изменяется от 0,49 до

1,45, а относительные понижения – от 0,78 до 1,51 (см. рис. 4), что также является индикатором существенного влияния геофильтрационной неоднородности, обусловленной различием литологических фаций.

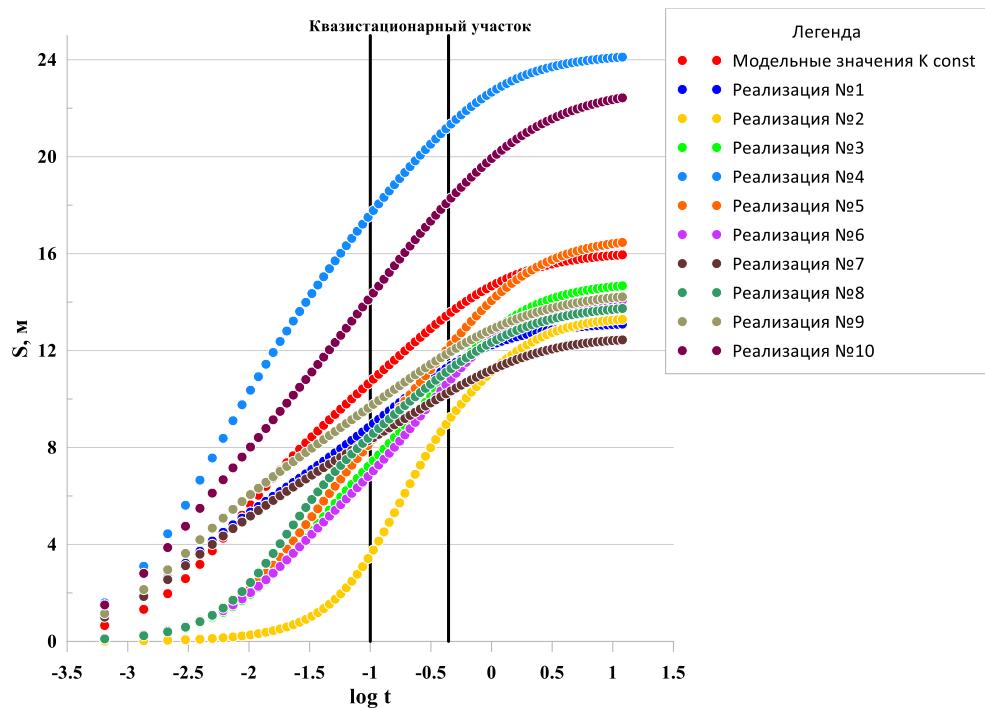


Рис. 3. Результаты моделирования откачки

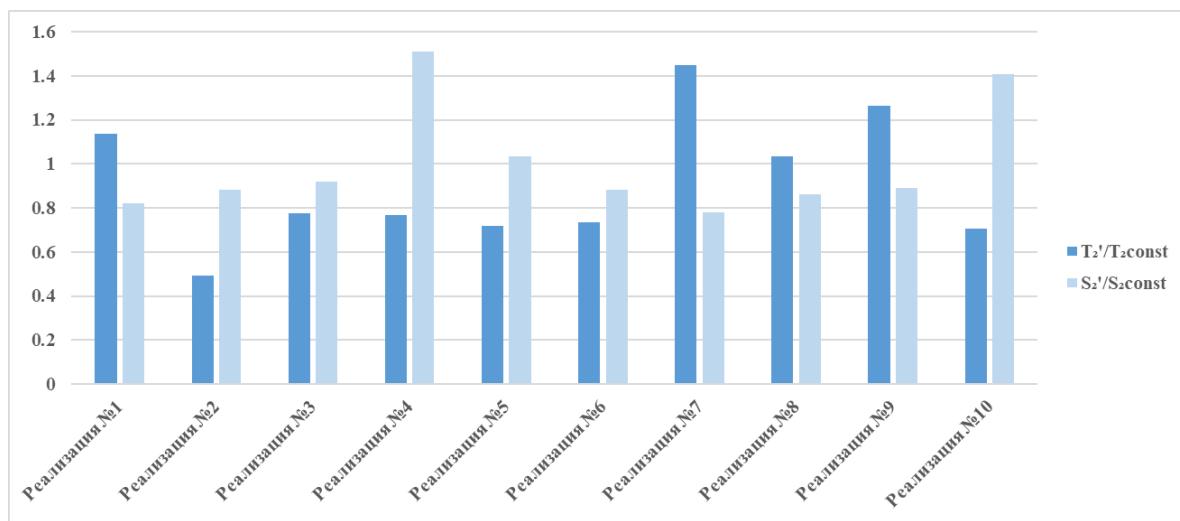


Рис. 4. Диаграмма сопоставления модельных результатов откачки при постоянной проводимости и с учетом фильтрационной неоднородности водоносного горизонта

Таким образом, проведенные исследования показали, что причиной существенно разных значений кажущейся проводимости целевого пласта, получаемой на изучаемом месторождении, скорее всего, являются не технические проблемы, которые связаны с проведением того или иного опыта, а его трехмерная неоднородность геофильтрационного строения.

## Список литературы

1. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.
2. Сизов Н.Е., Поздняков С.П., Муромец Н.Н. Влияние плановой неоднородности проводимости на результаты обработки откачек в изолированном неограниченном пласте // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2021. № 3. С. 113–123.
3. Справочное руководство гидрогеолога / Под ред. В.М. Максимова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1979. Т. 1. 512 с.
4. Филимонова Е.А., Мошин В.Е. Обработка опытно-фильтрационных работ при переменном дебите (Симферопольское месторождение подземных вод) // Геология и водные ресурсы Крыма. Полевые практики в системе Высшего образования / Под ред. В.В. Аркадьева. СПб.: Изд-во ЛЕМА, 2022. С. 68–71.
5. Dagan G., Lessoff S.R. Transmissivity upscaling in numerical aquifer models of steady well flow: conditional statistics // Water Resources Research. 2007. Vol 43. Issue 5. ID W05431. <https://doi.org/10.1029/2006WR005235>.
6. Naranjo-Fernández N., Guardiola-Albert C., Montero-González E. Applying 3D geostatistical simulation to improve the groundwater management modelling of sedimentary aquifers: the case of Doñana (Southwest Spain) // Water. 2019. Vol. 11. No. 1. ID 36. <https://doi.org/10.3390/w11010039>.
7. Remy N., Boucher A., Wu J. Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 285 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139150019>.

**V.E. Moshin, E.A. Filimonova, S.P. Pozdnyakov**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, moshin\_v@mail.ru

## GEOSTATISTICAL MODELLING FOR ESTIMATION OF PERMEABILITY HETEROGENEITY

**Abstract.** The influence of spatial heterogeneity on the results of interpretation of experimental pumping is analyzed on the example of the Goteriv-Barremian complex of the Simferopol field. The comparison is based on simulating a twelve-day pumping from a central well. Heterogeneity is introduced through geostatistical modelling of the investigated area. Ten equally probable realizations of the geological space are constructed using the sequential indicator kriging method for three categories of identified deposits – “good”, “medium”, and “poorly” permeable. The influence of filtration heterogeneity on the specific discharge of the central well is determined: under identical external conditions and without considering the skin effect, the range of specific discharges relative to a homogeneous model varies from 3.5% to 46.5%.

**Key words:** hydraulic conductivity; groundwater model; geostatistical modelling; vertical permeability heterogeneity.

**Парамонов А.Е.<sup>1</sup>, Патрикеев П.А.<sup>2</sup>, Бердичевская Т.А.<sup>1</sup>, Кобзев А.Г.<sup>1</sup>,  
Овинников А.Е.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Филиал АО «Атомэнергопроект» – Санкт-Петербургский научно-исследовательский изыскательский институт  
«Энергоизыскания», г. Санкт-Петербург, info@aep.ru

<sup>2</sup>АО «Атомэнергопроект», г. Москва

## **РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПРОЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ QGIS**

**Аннотация.** Приведено описание разработанной Экспертной системы гидрогеологических рисков, описана архитектура построение системы, приведены сведения о расчетном сервере системы. Представлена информация о решаемых задачах Экспертной системы. При разработке системы использовались: ГИС-технологии, Big Data – работа с неструктурированными массивами данных большого объема, Web-технологии, методы построения 3D моделей геологического пространства, математического моделирования, методы статистического анализа пространственных данных.

**Ключевые слова:** экспертная система; оценка рисков; подтопление; геоинформационная система; опасные гидрогеологические процессы; QGIS.

Экспертная система оценки гидрогеологических рисков – это интеллектуальный ассистент (помощник) для поддержки и научного сопровождения работы специалистов в ходе задач, связанных с оценкой рисков проявления опасных гидрогеологических процессов и явлений, эффективное средство автоматизации [1].

Цели создания Экспертной системы оценки гидрогеологических рисков:

– программная поддержка и сопровождение процессов сбора, обработки, анализа и оценки исходной информации, необходимой для выполнения оценки риска проявления опасного гидрогеологического процесса. Научное сопровождение инженерных изысканий;

– создание единой тематически ориентированной информационной системы объекта;

– повышение качества (полноты, точности, достоверности, своевременности, согласованности) информации, используемой для оценки риска возникновения опасного гидрогеологического процесса;

– повышение производительности труда специалистов.

Задачи, решаемые Экспертной системой оценки гидрогеологических рисков:

– программная поддержка и сопровождение процессов сбора, обработки, анализа и оценки исходной информации, необходимой для выполнения оценки риска проявления опасного гидрогеологического процесса – подтопления;

– оценка риска проявления опасного гидрогеологического процесса – подтопления: идентификация, анализ, сравнительная оценка риска;

– обработка выявленного риска: разработка, анализ и оценка результативности методов и инструментов управления риском, выбор меры воздействия и оценка эффекта от реализации варианта реагирования на риск.

Технология экспертной системы относится к трендам цифровой трансформации производства, т.к. включает в себя автоматизированную информационную систему анализа большого массива данных инженерных изысканий и помочь в быстром принятии управленческих решений на основе экспертных знаний [1, 2].

Экспертная система оценки гидрогеологических рисков представляет из себя программный продукт, реализованный с использованием трехуровневой архитектуры, составными частями которой являются – Web-интерфейс пользователя, сервер приложений и сервер баз данных. Пользовательский интерфейс представляет из себя веб-приложение, работающее в браузере. Бизнес-логика, а именно работа с данными и вся функциональность модуля расчетов исполняется на сервере, который обеспечивает необходимый уровень производительности, в т.ч. за счет возможности кэширования данных и осуществления параллельных вычислений (рис.).

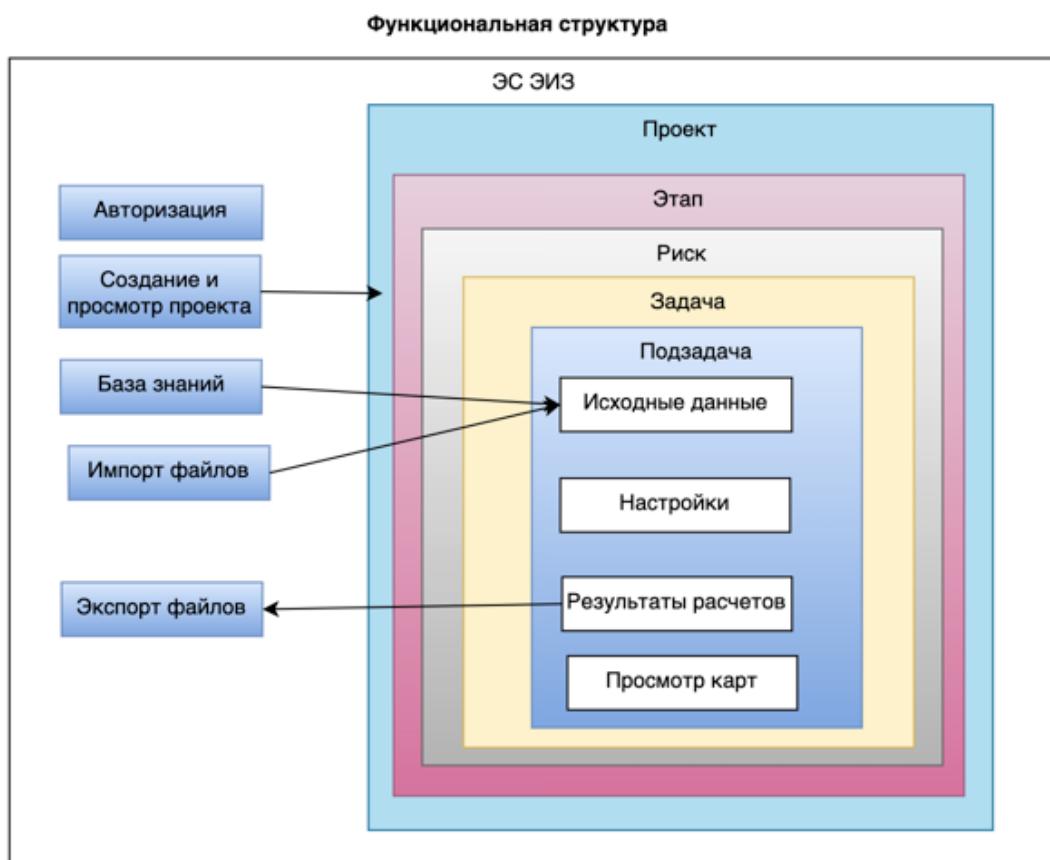


Рис. Функциональная структура

Расчетный сервис Экспертной системы оценки гидрогеологических рисков реализован на базе геоинформационной системы QGIS.

QGIS – это геоинформационная система с открытым исходным кодом. Геоинформационная система является кроссплатформенной и работает на Linux, Unix, Mac OSX, Windows и Android. Данная геоинформационная система поддерживает большинство современных векторных и растровых файловых форматов, а также позволяет подключаться к базам данных. QGIS обладает большой библиотекой расчетных инструментов и модулей, которая постоянно расширяется.

Непосредственно расчетный сервис Экспертной системы оценки гидрогеологических рисков представляет из себя python-приложение. С его помощью производится работа с геоданными, собственно расчеты, импорт необходимых слоев, а также экспорт проектов.

Экспертная система оценки гидрогеологических рисков в настоящее время позволяет проводить расчеты задачи по оценке подтопления территории при проведении двух этапов – выбор пункта и площадки размещения атомной электростанции (АЭС) (мелкомасштабный) и разработка проектной и рабочей документации (крупномасштабный).

Подзадачи, решаемые на этапе выбора пункта и площадки размещения АЭС:

- выбор оцениваемой территории;
- оценка естественной подтопленности территории;
- оценка опасности выявленного подтопления;
- анализ условий и особенностей формирования выявленного подтопления территории установление причин (значимых факторов) его возникновения;
- оценка потенциальной подтопляемости неподтопленных территорий;
- оценка опасности потенциального подтопления территории при ее строительном освоении;
- оценка условий формирования возможного подтопления для потенциально подтопляемых территорий, выявление значимых факторов риска проявления подтопления;
- построение пунктов и площадок строительства АЭС. Дополнительное исследование пункта и площадки;
- сравнительный анализ площадок и выбор оптимальной площадки размещения АЭС.

Подзадачи, решаемые на этапе «Разработка проектной и рабочей документации»:

- загрузка информации о геологическом строении территории;
- оценка естественной подтопленности потенциальной площадки;
- построение гидрогеологической и параметрической моделей;
- оконтуривание водосборных речных бассейнов;
- оценка инфильтрационного питания;
- вероятностные оценки процесса подтопления в различные по водности годы;
- прогноз уровенного режима при дополнительной инфильтрации;

- оценка подтопления строительных объектов;
- оценка барражного эффекта;
- оценка точности и достоверности прогнозов.

Работа по созданию Экспертной системы оценки гидрологических рисков в настоящее время прошла этап идентификации и находится на стадии тестирования программного продукта. Специалистами производится оценка выбранного способа представлений в Экспертной системе в целом и проверка всех возможностей разработанной Экспертной системы оценки гидрологических рисков.

Реализация проекта улучшит следующие показатели: время сбора и обработки (анализа) исходной информации; качество данных по объекту и наглядность их представления; полноту выявленных критических факторов риска; время выполнения и качество оценки, обработки риска проявления опасного гидрологического явления; качество принимаемых управлеченческих решений.

### **Список литературы**

1. Возможности использования методов искусственного интеллекта при решении задач в области экологической безопасности / Т.А. Бердичевская, С.А. Переверзева, Н.А. Васькова, А.Г. Овинников, А.Г. Кобзев // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 9(63). Часть 3. С. 17–24.
2. Переверзева С.А., Кочнева М.Н. Специализированная база данных – как инструмент анализа и управления данными инженерно-геологических изысканий (на примере ЛАЭС) // Атомное строительство. 2011. № 5. С. 15–17.

**A.E. Paramonov<sup>1</sup>, P.A. Patrikeev<sup>2</sup>, T.A. Berdichevskaya<sup>1</sup>, A.G. Kobzev<sup>1</sup>,  
A.E. Ovinnikov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Branch of Atomenergoproekt JSC – Saint Petersburg Research and Survey Institute “Energoizyskaniya”,  
Saint Petersburg, info@aep.ru

<sup>2</sup>Atomenergoproekt JSC, Moscow

## **DEVELOPMENT OF AN EXPERT SYSTEM FOR RISK ASSESSMENT OF DANGEROUS HYDROGEOLOGICAL PROCESSES AND PHENOMENA USING QGIS SYSTEM**

**Abstract.** The description of the developed Expert system of hydrogeological risks is given, the architecture of the system construction is described, information about the calculation server of the system is given. Information about the tasks of the Expert System is presented. During the development of the system were used: GIS technologies, Big Data – working with unstructured data arrays of large volume, web-technologies, methods of building 3D models of geological space, mathematical modelling, methods of statistical analysis of spatial data.

**Key words:** expert system; risk assessment, waterlogging; GIS; hazardous hydrogeological; processes; QGIS.

**Луканов Д.Д., Растиоргус И.А., Мухина Л.Н.**

АО «Институт Гидропроект», г. Москва, dmitrii\_lukanov@mail.ru, stiar@mail.ru, lyubovrozhnova@yandex.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОДОВ, НАПИСАННЫХ НА ЯЗЫКЕ PYTHON, ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПЕРЕСТРОЕНИЯ МОДЕЛЬНОЙ СЕТКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГЕОФИЛЬТРАЦИИ В СРЕДЕ DHI FEFLOW**

**Аннотация.** В данной статье приводится метод, позволяющий автоматически перестроить сетку геофильтрационной модели, разработанной в программном комплексе DHI Feflow. Из-за изменения проектных решений производится уточнение сетки модели с помощью скриптов, написанных на языке Python. Данный подход позволяет значительно ускорить работу по актуализации геофильтрационной модели без полного ее пересбора.

**Ключевые слова:** геофильтрация; водонапорное; математическое моделирование; DHI Feflow; конечно-элементная сетка; Python.

### *Введение*

Для обоснования проектных решений по водоотведению при разработке строительных котлованов крупных инженерных сооружений, в т.ч. и гидротехнических (гидроэлектростанций, малых гидроэлектростанций, атомных электростанций, атомных станций малой мощности), чаще всего применяется метод численного моделирования геофильтрации подземных вод. При работе с численными моделями нередко возникает проблема с изменением сетки, сгенерированной на начальном этапе работы. Данная задача особенно актуальна для тех специалистов, которые работают в режиме постоянно актуализируемых проектных решений. Часто при принятии решения проектными организациями требуется оперативная адаптация численной модели под поставленные цели. При этом возникает потребность в перестроении начально сгенерированной модельной сетки, без изменения естественных граничных гидрогеологических условий и параметров геофильтрационной модели.

В настоящей работе приводится опыт работы авторов в программном комплексе DHI Feflow (версии 7.1–7.5) [4], основанный на конечно-элементной дискретизации, позволяющий учесть геологическую неоднородность массива, пространственную структуру фильтрационного потока и свободную поверхность. Последняя может быть учтена сеткой, которая повторяет положение свободной поверхности. Либо может быть задано остаточное влагосодержание для осущенности ячейки. Программное обеспечение Feflow дает возможность задать котлованы сооружений любой конфигурации, учитывать конструкцию противофильтрационной защиты (ПФЗ) и мониторинговой сети скважин, а также позволяет делать расчет тепло- и массопереноса и многое другое.

Отечественным программным комплексом, основанным на конечно-элементной дискретизации, для расчетов двухмерной фильтрации в разрезе, является программа PERFIL [2].

### *Способы адаптации модельных сеток в программном комплексе DHI Feflow*

Для работы с конечно-элементными сетками в программном комплексе DHI Feflow предусмотрены три способа адаптации и улучшения качества сетки, представленные на рис. 1. Все эти методы предназначены для того, чтобы справиться с проблемами, возникающими при автоматической генерации некачественной сетки либо в результате вынужденного изменения сетки в процессе работы.

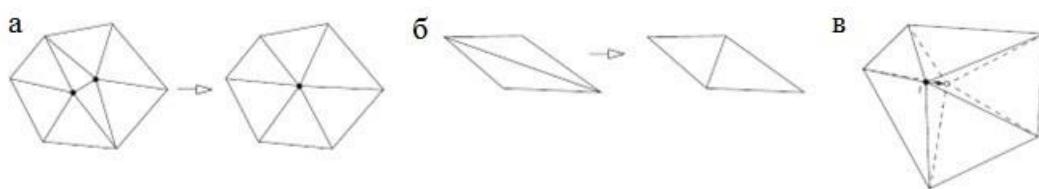


Рис. 1. Методы улучшения качества сетки: а – соединение близких (слипшихся) узлов; б – переброс диагонали для элементов, напоминающих форму «щепки»; в – сдвиг узла

Дополнительно, в DHI Feflow при генерации сетки есть возможность выбрать режим, позволяющий учитывать выполнение критерия Делоне. Триангуляцией Делоне называется такой способ генерации сетки, при котором для любого элемента (треугольника) сгенерированной сетки верно, что внутри описанной около него окружности не находится всех узлов другого элемента. Впервые данный критерий был описан в 1934 г. советским математиком Б.Н. Делоне [3] (рис. 2).



Рис. 2. Сетка: красный треугольник – удовлетворяющий критерию Делоне, синий треугольник – не удовлетворяющий критерию Делоне

Триангуляция Делоне максимизирует минимальный угол среди всех углов всех построенных треугольников, тем самым избегаются «тонкие» треугольники [1]. Приходится избегать такого типа треугольников из-за особенностей метода конечных элементов. Его погрешность обратно пропорциональна синусу минимального или максимального угла сетки.

При большой размерности задачи адаптация и улучшение качества сетки могут быть выполнены в автоматическом режиме, с помощью скриптов, написанных на языке Python. Применение этих скриптов показано далее, на примере задачи с водопонижением в котловане, когда изменения сетки возникают из-за корректировки проектных решений для уже разработанной геофильтрационной модели, выполняющей расчеты. Однако, скрипт подходит и для любых других задач, в которых есть необходимость по перестроению начально сгенерированных сеток. Например, со схожими проблемами сталкиваются гидрогеологи при решении задач по подбору способа водопонижения: был изначально запроектирован открытый водоотлив из котлована, а в процессе проектирования его заменили на шахтно-лучевой дренаж или вертикальный дренаж. Также данный способ будет актуален и при подборе оптимального местоположения ПФЗ или скважин перехватывающего водозабора при загрязнении подземных вод и т.д.

В описываемой ситуации необходимо было изменить конфигурацию модельной сетки для того, чтобы она учитывала новые проектные изменения контуров строительных котлованов и местоположения ПФЗ, что повлекло бы за собой пересборку всей уже собранной модели с нуля (повторное задание модельных слоев, коэффициентов фильтрации, граничных условий, дренажных скважин и др.). Далее в публикации показан результат работы алгоритма, позволяющего учесть новую компоновку сооружений без необходимости в повторной сборке геофильтрационной модели.

### *Описание решаемой задачи*

Геофильтрационная модель создавалась для обоснования проектных решений по защите от неблагоприятного воздействия подземных вод на участке строительства гидротехнических сооружений. Основная задача, которая ставилась перед этой моделью – выполнение моделирования прогнозных геофильтрационных процессов с целью оценки приточности в строительные котлованы, определения притоков воды в системы вертикальных дренажных скважин и оценка возможности возникновения супфозионных процессов.

Котлованы гидротехнических сооружений имеют проектную глубину до 30 м и огорожены противофильтрационной завесой (ПФЗ) до абс. отм. –48 м (рис. 3). Внутри котлованов по периметру в качестве мер по водопонижению предусмотрен ряд самоизливающихся скважин. Условием оптимального снижения уровня подземных вод внутри котлована являлось достижение их абсолютной отметки на 1 м ниже отметки дна котлована.

Гидрогеологические условия участка работ обусловлены наличием четвертичных песчано-суглинистых и разной степени сохранности неогеновых карбонатных отложений. Мощность отдельных слоев карбонатных отложений может достигать нескольких десятков метров. На глубине более 100 м залегают

слабопроницаемые отложения известняка (относительный водоупор), принятые на модели в качестве нижней границы.

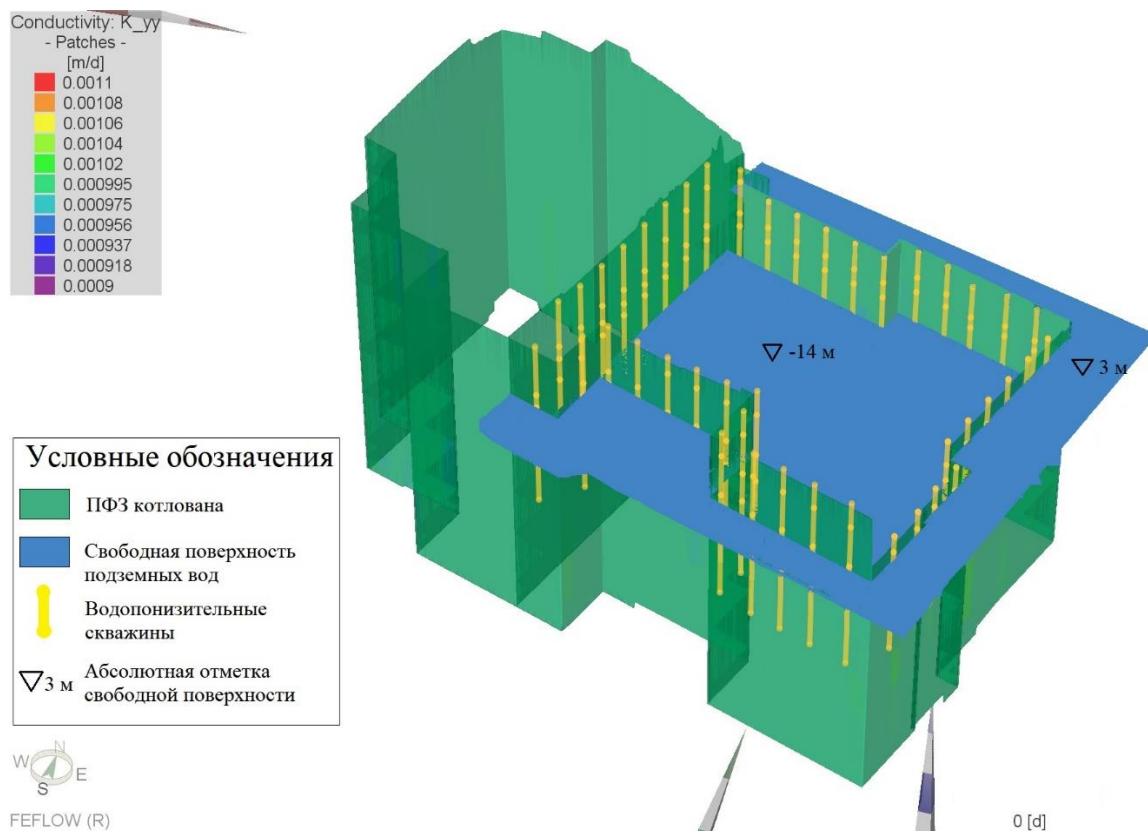


Рис. 3. Фрагмент части котлована с положением ПФЗ, скважин водопонижения и свободной поверхности подземных вод в трехмерном виде на модели

Высокие значения водопритоков в строительные котлованы обусловлены наличием регионального потока, направленного в сторону акватории, близостью участка работ к самой акватории, а также наличием высокопроницаемой толщи известняка-ракушечника в верхней части разреза.

Модель геофильтрации для данного участка работ разработана в трехмерной стационарной постановке. Расчетная область в плане имеет размеры около  $4,5 \times 5,5 \text{ км}$  и была разбита на 10 слоев, 2 378 585 узлов и 4 322 550 элементов.

Процесс сборки геофильтрационной модели для заранее известных проектных решений по готовым чертежам не представляет сложностей.

В программе DHI Feflow реализована возможность задания геоинформационной системы объектов на основе любых форматов данных – графических (BitMap, Geo-Tiff, Geo-JPeg, Png), векторных (AutoCad, ArcGis, Feflow-SuperMesh), и текстово-числовых. Работа с этими объектами – первая стадия подготовки модели. Таким образом процесс разработки модели можно разделить на следующие части:

- подготовка основных контуров, структур (2D, 3D) модельной области (как правило, делается во внешней программе – AutoCad, ArcGis, GoldenSoftwareDidger, MapInfo) и разделение по геометрическим признакам – точка, полилиния, многоугольник;
- первичная подготовка контуров сетки или сборка суперсетки (Supermesh), в ходе которой происходит разделение модельных контуров по признакам – точки (скважины), полилинии (контуры границ модели, линии рек), многоугольники (водоемы);
- генерация сетки по модельным контурам и в случае удачной генерации – последующий шаг;
- задание параметров модели граничных условий и источников стоков по сгенерированной сеточной области;
- запуск модельного расчета.

Если первоначальный этап – автоматическая генерация модельной сетки по созданной суперсетке (Supermesh) не занимает большого времени и труда, при условии, что имеются исходные данные в цифровом виде, то следующий этап – добавление стратиграфических элементов, параметрических особенностей модели, граничных условий, отметок котлованов, положения ПФЗ, внесение проектных дренажных систем занимает продолжительное время. Это связано с высокой детализацией модели, сложными гидрогеологическими условиями, большим количеством трехмерных инженерных сооружений, которые необходимо учесть при выполнении расчетов. Наполнение модельной сетки возможно только после создания самой сеточной структуры. Получается, что специалист, занимающийся сборкой моделей, часто сталкивается с проблемой повторной сборки модели с нуля, если по каким-то причинам следует изначально сгенерированную сетку перестроить или уточнить в каких-то отдельных ее частях.

Авторы публикации смогли облегчить и ускорить процесс уточнения модельной сетки при помощи подключения скрипта, написанного на языке Python.

Основная сложность работы по объекту исследования состояла в частом пересмотре проектных решений в виде изменений контуров котлованов, положения ПФЗ и, соответственно, систем водопонижения по независящим от специалистов, занимающихся моделированием, причинам. Внесение новых изменений по положению сооружений в программном комплексе Feflow требовало долговременного пересбора модели.

Решение, позволяющее ускорить уточнение модельной сетки без полного пересбора модели под новый конструктив, было реализовано при помощи использования программного функционала DHI Feflow, реализованного с помощью интерпретатора Python v2.7 и доступного в Feflow начиная с версии 7.1. Программный интерфейс обладает рядом API-функций, одна из которых MoveNode, позволяющая выставить узлы сетки вдоль выбранной линии чертежа вручную. Однако, написанный скрипт дает возможность запустить в автономном

режиме фрагментарное перестроение сетки, которое учитывает актуальные проектные решения за минимально короткие сроки. Примеры фрагментов перестройки сетки по изменившимся проектным решениям показаны на рис. 4.

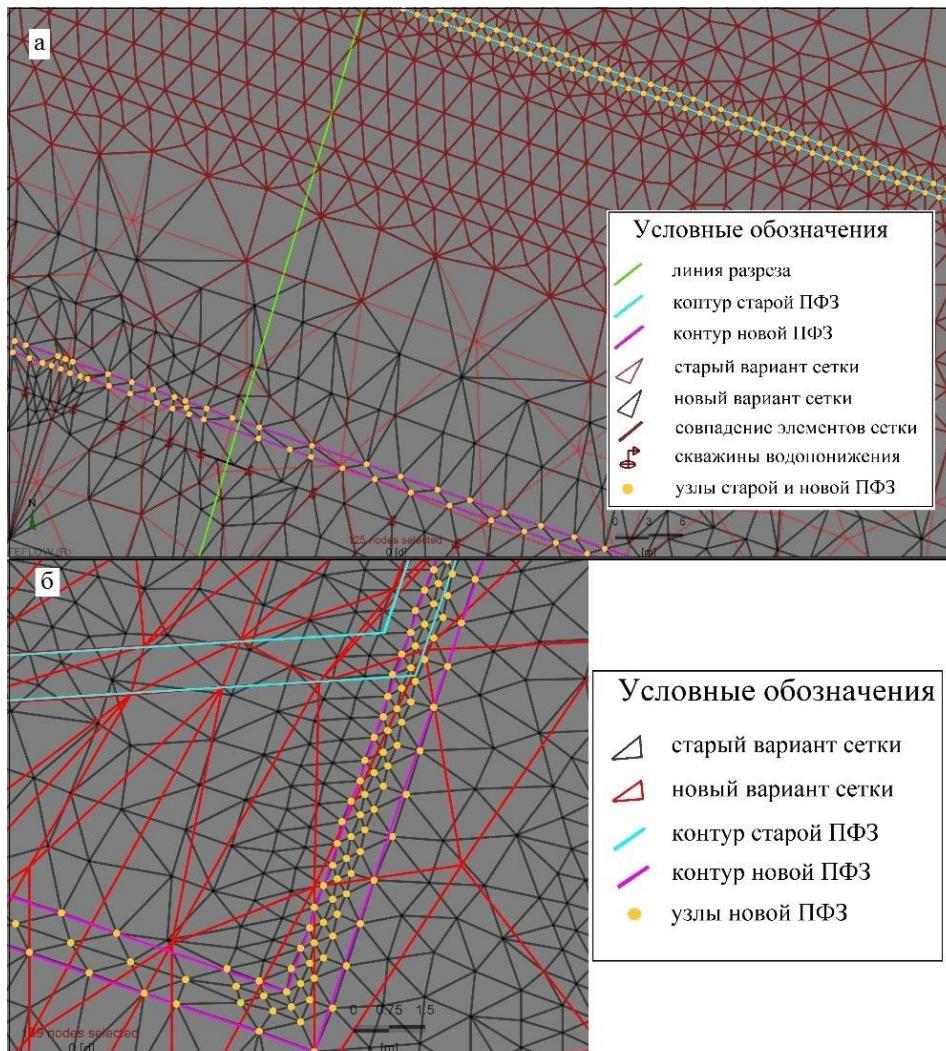


Рис. 4. Результат автоматизированного перестройки модельной сетки с помощью скрипта для изменившихся проектных условий: а – изменение местоположения ПФЗ, б – изменение контура ПФЗ

Побочным эффектом перестройки сетки с помощью скрипта, негативно влияющим на качество расчета, может быть ухудшение качества сетки «слипанием» узлов (рис. 5), когда вид треугольных элементов напоминает форму «щепки» (по-английски slivers [4]) и сетка не удовлетворяет критерию Делоне в этой части. Это влияет на качество расчета, т.к. элементы в форме «щепок» имеют острые или тупые углы, приводящие к низким значениям синуса минимального или максимального угла сетки.

Данная проблема пока решается вручную, но в дальнейшем будет реализован код на Python, позволяющий автоматически находить такие элементы и устранять слипание.

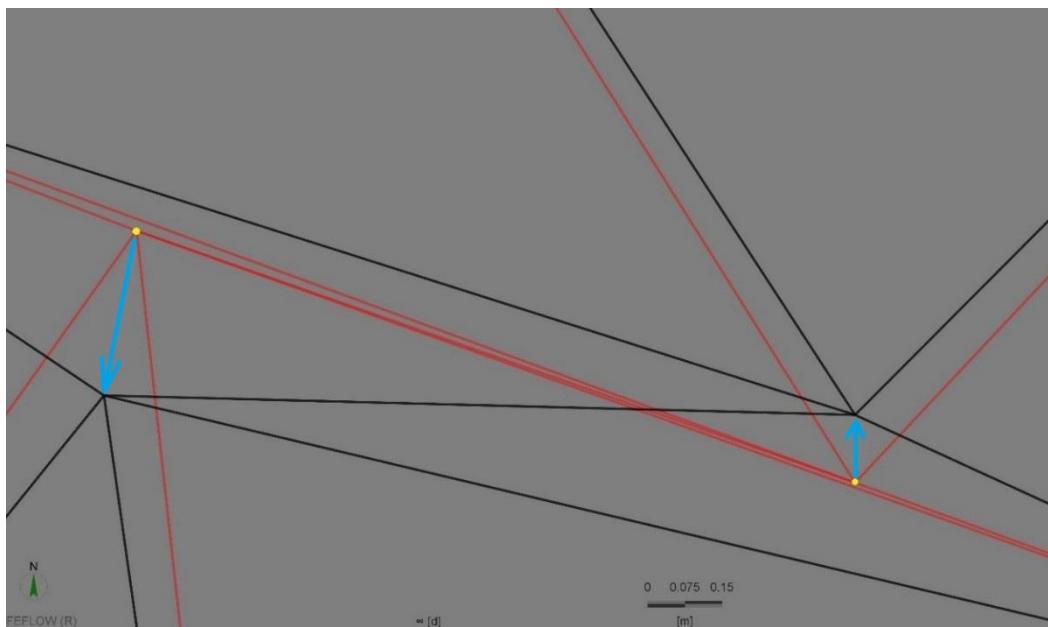


Рис. 5. Пример «слипания» узлов. Желтым цветом показаны «слипающиеся» узлы, черным цветом – сетка после исправления «слипания»

### Выводы

Реализация скрипта, написанного на языке Python, позволила оперативно поменять сетку и просчитать более десятка версий проектных решений. Произвести геофильтрационные расчеты, оценив приточность к скважинам водопонижения, и показать форму депрессионной кривой в районе котлована и оценить суффозионную устойчивость грунтов.

Программный функционал DHI Feflow, позволяет подключать скрипты Python v2.7, что помогает решать многие задачи, которые ставятся перед специалистом-гидрогеологом и упрощают его работу, а также значительно сокращают временные затраты на обработку материалов, задание модельных параметров, работу с сеткой модели и расчет проектных решений. Применение встроенных интерпретаторов языка Python будет в дальнейшем развиваться, и как правило, улучшать качество моделей и их сеток.

### Список литературы

1. Галанин М.П., Щеглов И.А. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: итерационные методы // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2006. № 9. С. 1–32.
2. Лехов М.В. Метод конечных элементов в профильных моделях фильтрации со свободной поверхностью. Программа PERFIL // Инженерная геология.

2023. Т. XVIII. № 2. С. 44–63, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-2-44-63>.

3. Delaunay B. Sur la sphère vide // Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk. 1934. Vol. 7. P. 793–800.
4. Diersch H.-J.G. FEFLOW Software – finite element subsurface flow and transport simulation system reference manual. Berlin, Germany: WASY GmbH, 2005.

**D.D. Lukhanov, I.A. Rastorguev, L.N. Muhina**

Institute Hydroproject JSC, Moscow, dmitrii\_lukanov@mail.ru, stiar@mail.ru, lyubovrozhnova@yandex.ru

**APPLICATION OF CODES FOR DYNAMIC ADAPTATION  
OF A GRID MODEL IN SOLVING PROBLEMS OF DRAWDOWN  
IN THE DHI FEFLOW SOFTWARE**

**Abstract.** This article represents a method that allows to refine the grid of the groundwater flow model developed in the Feflow software package. Due to changes in design decisions the model mesh is refined using scripts in the Python. This approach allows to speed up significantly the work updating the groundwater flow model without completely rebuilding it.

**Key words:** groundwater flow; drawdown; mathematical simulation; DHI Feflow; finite element mesh; Python.

**Расторгуев И.А., Пиотровский А.С.**

АО «Институт Гидропроект», г. Москва, stiar@mail.ru

## **К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУФФОЗИИ В НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ**

**Аннотация.** Из-за высоких градиентов на контакте основания перемычки и тела дамбы возникает механическая суффозия с выносом частиц основания в нижний бьеф. Это приводит к увеличению пористости и проницаемости. Дан прогноз лавинообразного развития процессов суффозии.

**Ключевые слова:** суффозия; критический градиент; математическое моделирование; DHI Feflow; Python; геофильтрация.

### *Введение*

Классификацию фильтрационной деформации грунтов впервые предложил Н.М. Бочков (1936) [3]. Он впервые использовал термин «суффозия», предложенный в 1898 г. академиком А.Н. Павловым. Явление суффозии Н.М. Бочков представлял как изменение химико-физико-механического состава грунтовой массы, которое возможно классифицировать следующим образом:

- а) химическая суффозия – вымывание растворимых солей;
- б) коллоидальная суффозия – вымывание части грунта с разрушением микроагрегатов коагулированных глинистых частиц;
- в) механическая суффозия – вымывание мелких частиц грунта из пор более крупных его частиц;
- д) суффозия массы – вынос или выпор всей массы грунта.

В данной работе будет рассматриваться вариант механической суффозии.

Методика оценки критических скоростей выноса изначально была предложена В.С. Истоминой в 1957 г. Далее эти оценки рассматривались М.П. Павличем, А.Н. Патрашевым, Д.Н. Минцем, Ю.М. Шахтманом [5]. Н.Е. Леонтьевым [2] рассматривались теоретические исследования по миграции взвеси в фильтрационном потоке. Постановка задачи, решаемой последним автором, была более сложной, чем рассматривается в этой работе, т.к. учитывала миграцию суспензий, приводящую к суффозии и кольматажу одновременно.

### *Процедура учета изменения проницаемости из-за суффозии*

Изменение пористости учитывается за счет выноса частиц. Предполагается, что за шаг по времени  $dt$  выносится  $N$  наименьших по размеру частиц. При этом увеличивается объем пор на размер вынесенных частиц. Изменение пористости вычисляется следующим образом:

$$n(t + dt) = n(t) - N \cdot \frac{\pi}{6} d^3, \quad (1)$$

где  $dt$  – шаг по времени;  $n(t)$ ,  $n(t + dt)$  – пористость до и после выноса частиц;  $N$  – количество выносимых за шаг по времени частиц;  $d$  – размер наименьших частиц, мм.

Считается, что частицы выносятся из модели, при этом нигде не переосаждаются. По умолчанию – «растворяются».

Для оценки изменения проницаемости от пористости из-за выноса частиц может быть использована зависимость, предложенная М.Д. Минцем. Эта зависимость ориентирована на связь проницаемости через пористость вследствие процессов кольматажа при условии малого изменения удельной поверхности пористой среды [1]:

$$K(t + dt) = K(t) \left( \frac{n(t + dt)}{n(t)} \right)^m, \quad (2)$$

где  $K(t)$ ,  $K(t + dt)$  – коэффициент фильтрации до и после выноса частиц;  $m$  – показатель степени, который изменяется в диапазоне 2,8–3,3.

Вынос количества частиц  $N$  в ячейке, где градиент превышен, может быть вычислен следующим образом:

$$N = v_e \cdot dt \cdot \frac{N_{tot}}{n(t) \cdot l}, \quad (3)$$

где  $e$  – номер ячейки,  $v_e$  – скорость в ячейке  $e$ ;  $N_{tot}$  – количество всех суффозионных частиц в ячейке,  $l$  – характерный размер ячейки. При этом величина  $dt$  задается так, чтобы за шаг по времени не вынеслось более  $N_{tot}$  частиц и  $dt < l/v_e$ .

### *Алгоритм вычисления суффозионных процессов*

Для оценки областей возникновения суффозии в процессе расчета авторами был предложен пошаговый алгоритм, представленные на рис. 1.

### *Постановка задачи*

При реконструкции одной из плотин на реке А (рис. 2) потребовалось экстренное возведение временной перемычки для обеспечения строительных работ в русле реки. Перемычка отсыпалась из крупнообломочных отложений, в основном представленных валунником. Отсыпка происходила пионерным

способом. В основании перемычки залегали мелкозернистые отложения, обладающие, как было установлено, высокими суффозионными свойствами. Наибольшая активность суффозии ожидалась на контакте отсыпки из валунника и мелкозернистых отложений, залегающих в основании перемычки.

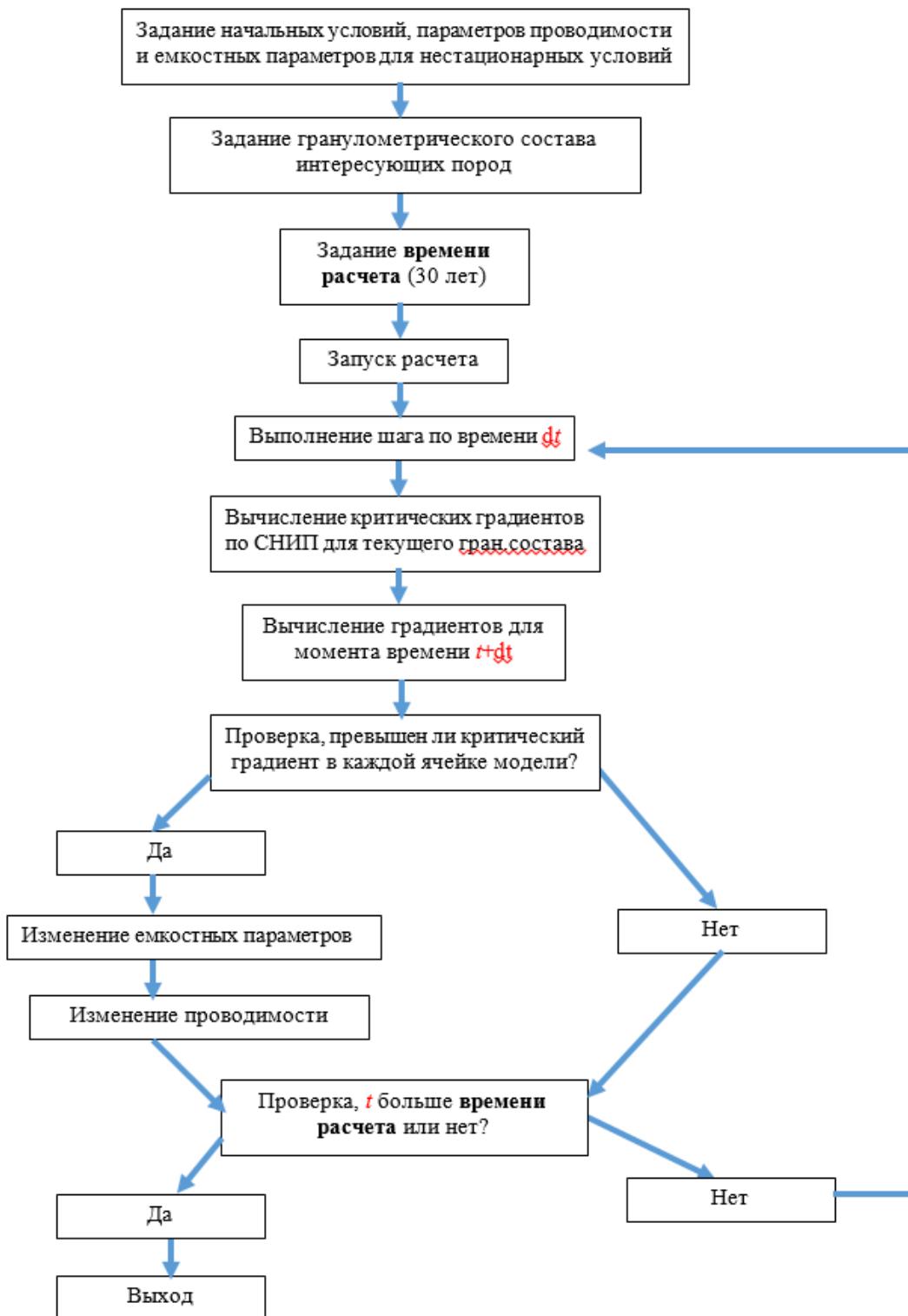


Рис. 1. Алгоритм расчета и изменения свойств из-за превышения критического градиента

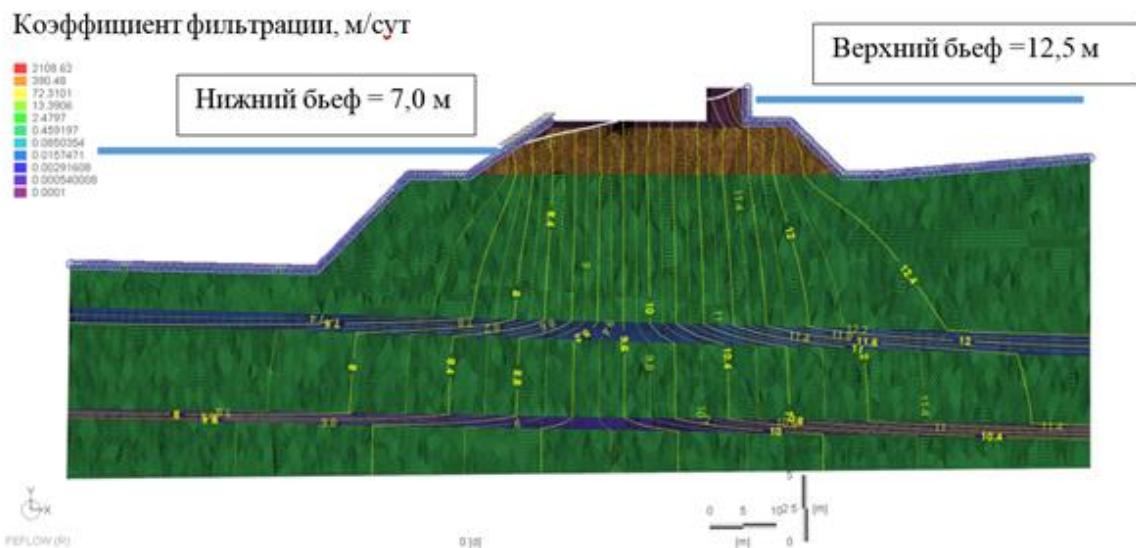


Рис. 2. Схема модельной области. Показана модельная сетка. *Обозначения:* желтым – распределение уровней; белым – депрессионная кривая; синими кружками – граничные условия; фиолетовая заливка – бетонная часть, зеленая заливка – суффозионное основание перемычки; синий и темно-синий цвет – суглинистые и глинистые отложения

В результате предварительной оценки коэффициент фильтрации отсыпки рассматривался близким 1000 м/сут. Проницаемость мелких песков, оцененная по гранулометрическому составу, принята 1 м/сут. Рассев для мелкозернистых песков и значения вычисленных для них критических градиентов показаны далее в табл. 1 и 2. Отметка уровня верхнего бьефа рассматривается равной 12,5 м, нижнего – 7,0 м. При длине пути фильтрации по самому короткому участку около 20–25 м может быть достигнут критический градиент, приводящий к суффозии (0,26–0,27), если рассматривать первый класс надежности сооружения. Это подтверждается также расчетом градиента, согласно СНиП 2.06.05-84 «Плотины из грунтовых материалов» [4], (0,265–0,2791) (см. табл. 2).

Расчеты лавинообразного возникновения суффозии были проведены на разработанной для этого случая двумерной профильной модели в среде DHI Feflow 7.5, использующей конечно-элементную схематизацию и возможность внедрения пользовательских вычислений на языке Python.

Схема модели показана на рис. 2. Модельная область разбита на 47 077 узлов и 93 056 элементов. Размеры ячеек (элементов) – от 0,01 до 0,40 м. Размеры модельной области: по горизонтали – 140 м, по вертикали – 28 м. Отметка верхнего бьефа задана равной 12,5 м, нижнего – 7,0 м.

Коэффициенты фильтрации отсыпки заданы неравномерно – от 30 до 2108 м/сут (среднее значение около 1000 м/сут). В основании пески с коэффициентом фильтрации 1 м/сут и прослой суглинков и глин. Проницаемости последних – 0,010 и 0,001 м/сут. Удельная упругоемкость – 0,0001 м<sup>-1</sup>, гравитационная водоотдача – 0,2, пористость – 0,3.

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции  
 «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
 г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

Таблица 1  
 Характерный гранулометрический состав для мелкозернистых отложений для скважины № 1  
 с глубины опробования 10 м

Гранулометрический состав, мм	Содержание, %
40–20	0
20–10	0,5
10–5	0,4
5–2	0,3
2–1	0,6
1–0,5	2,9
0,5–0,25	26,6
0,25–0,1	50,0
0,1–0,05	10,7
0,05–0,01	6,1
0,01–0,005	1,9
< 0,005	0

Таблица 2  
 Расчет критических градиентов, согласно СНиП 2.06.05-84 [4]

Скважина №1					
Глубина, м	10.00				
Грунт	Песок мелкий				
Индекс	$f_{gl,lglQ \text{ гдн-мс}}$				
$D_5 = 0.004$	$D_{60} = 0.191$				
$D_{17} = 0.061$	$D_{10} = 0.017$				
$\eta_{60/10 < 25} = 11.0$	$\eta_{60/10 > 25} =$				
пористость грунта при $\eta < 25$					
$n$ при $n_0 = 0.40 =$	0.30	- для окатанных частиц			
$n$ при $n_0 = 0.45 =$	0.35	- для неокатанных частиц			
$n_0$	$N$ при $h < 25$	$\frac{D_5}{D_{17}}$	Суффозионно-устойчивы грунты при $D_5/D_{17} \geq N$		
0.40 =	0.3106	0.06			
0.45 =	0.3908				
$J_{cr}^e$ при $a = 15,7$	0.3489	$\eta < 25$	Критический градиент суффозии при котором могут быть вынесены суффозионные частицы		
$J_{cr}^e$ при $a = 25,7$	0.3312				
коэффициент критической скорости выноса частиц					
$\eta < 25$	$\phi_0 = 0.22$	- для окатанных частиц			
	0.16	- для неокатанных частиц			
$r_s =$	2.66				
$r_L =$	1.0				
приведенный коэффициент трения					
$f_{\text{тр}}$ при $\eta < 25 =$	0.33	- для окатанных частиц			
$f_{\text{тр}}$ при $\eta < 25 =$	0.24	- для неокатанных частиц			
Допустимый градиент напора					
Коэффициент надежности					
	I класс	II класс	III класс		
$\eta < 25$					
$J_{cr}^{\text{доп}}$ при $a = 15,7$	0.2791	0.2907	0.3034		
$J_{cr}^{\text{доп}}$ при $a = 25,7$	0.2650	0.2760	0.2880		
			IV класс		
			0.3172		
			0.3011		

Расчет выполнялся в нестационарной постановке. Длительность расчета – 20–30 лет. Начальные условия задавались исходя из гидростатического распределения уровней для указанных отметок нижнего и верхнего бьефа.

### Результаты расчета

Для демонстрации динамики изменения проницаемости и распределения уровней приводятся результаты расчета возникновения лавинообразной суффозии (рис. 3). Вычисления показаны на начальный момент, а также через 0,7; 3,7; 6,7; 10,7 и 20,7 лет с начала расчета. Отмечается обширная суффозионная область под телом перемычки. Ее развитие со временем увеличивается и может приводить к опасным процессам и просадке.

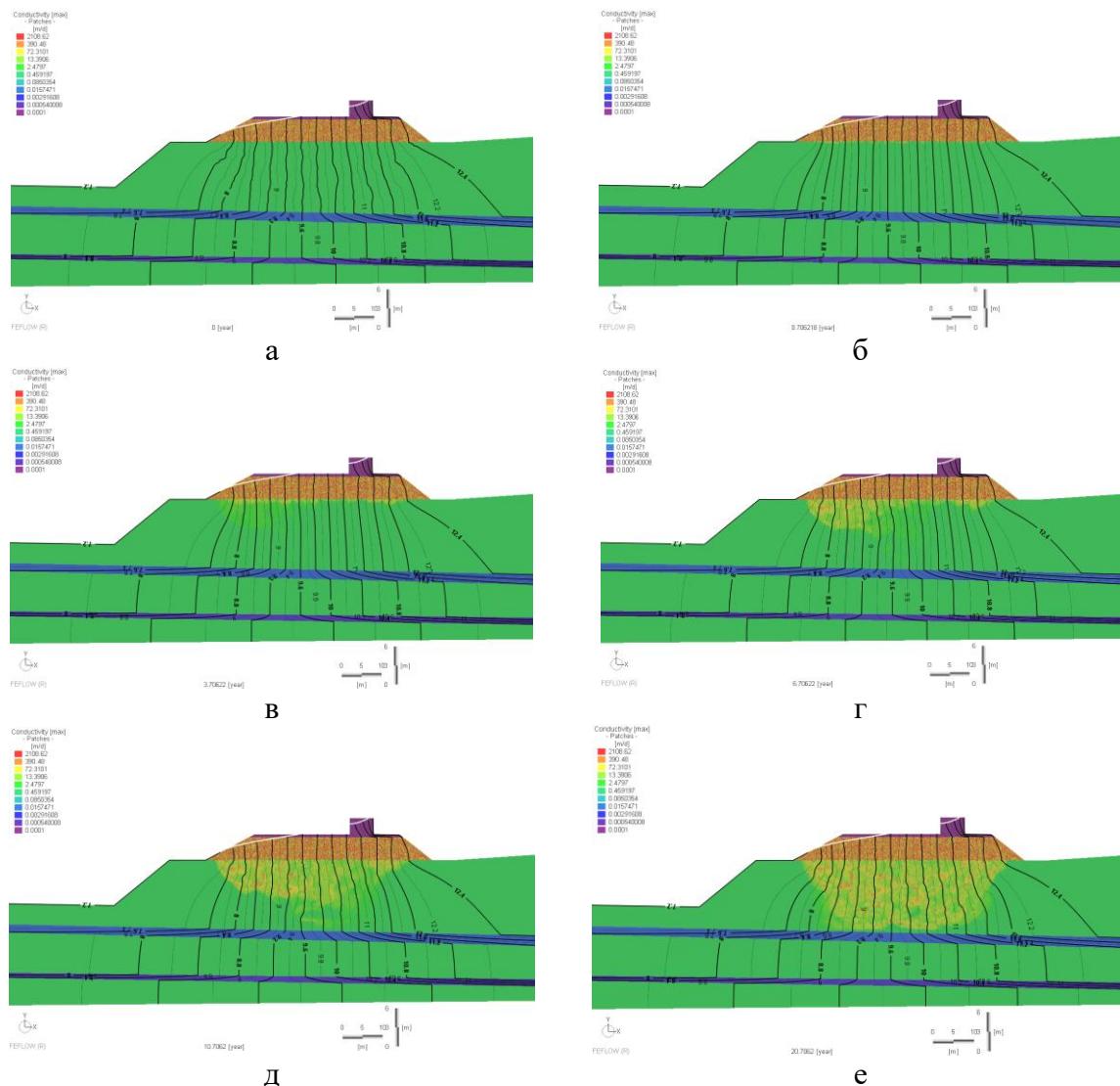


Рис. 3. Результаты расчетов изменения проницаемости на: а – начальный момент; б – 0,7 лет; в – 3,7 лет; г – 6,7 лет; д – 10,7 лет; е – 20,7 лет

### *Заключения по результатам расчета*

Предложенный подход позволяет оценить возникновение супфозии и ее лавинообразное распространение под основанием перемычки. Это может привести к разуплотнению основания и осадкам сооружения.

Однако реализуемый подход имеет много не решенных пока вопросов:

– количество выносимых за шаг по времени частиц определяется согласно формуле (3)? Но какое оно на самом деле и как посчитать;

– другой вопрос, который возникает, – это допущение о выносе частиц и «растворении». На практике вынесенные частицы будут кольматировать поры грунта ниже по потоку, в приведенной же модели они выносятся из ячейки, а значит, и из модели полностью без возврата;

– изменение деформационных свойств грунтового массива из-за выноса частиц далее не применяется в расчете;

– наступление условия просадки перемычки из-за выноса частиц.

Первые два вопроса авторы собираются решить в дальнейшем, рассмотрев процесс миграции супензий.

### **Список литературы**

1. Алексеев В.С., Гаврилко В.М. Фильтры буровых скважин. М.: Недра, 1976. 345 с.
2. Леонтьев Н.Е. Точные решения задачи о фильтрации супензии с замедлением скачка концентрации в рамках нелинейной двухскоростной модели // Известия РАН. 2017. № 1. С. 168–174.
3. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917–1967) / Под ред. П.Я. Полубариновой-Кочиной. М.: Наука, 1969. 545 с.
4. СНиП 2.06.05-84 Плотины из грунтовых материалов.
5. Шехтман Ю.М. К вопросу об определении объемной концентрации при фильтрации взвеси // Известия АН СССР. 1951. № 6. С. 839–843.

**I.A. Rastorguev, A.S. Piotrovsky**

Institute Hydropoject JSC, Moscow, stiar@mail.ru

## **ON THE ISSUE OF MODELLING SUFFOSION IN A NON-STATIONARY FORMULATION OF THE PROBLEM**

**Abstract.** Due to high gradients at the contact between the base of the coffer-dam and the body of the dam, mechanical suffusion occurs with the removal of base particles into the downstream. This leads to increased porosity and permeability. A forecast is given for the avalanche-like development of suffusion processes.

**Key words:** suffusion; critical gradient; mathematical modelling; DHI Feflow; Python; geofiltration.

## СЕКЦИЯ «ИЗЫСКАНИЯ НА ШЕЛЬФЕ»

**Ермолов А.А., Огородов С.А.**

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ геоэкологии Севера,  
г. Москва, [ermolov@geogr.msu.ru](mailto:ermolov@geogr.msu.ru)

### МОНИТОРИНГ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВ И ДНА ЗАМЕРЗАЮЩИХ МОРЕЙ КАК ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Аннотация.** Рассмотрены основные принципы и методические подходы к проведению мониторинга динамики берегов и дна замерзающих морей на этапах проектирования, строительства и эксплуатации инженерных объектов нефтегазового комплекса. Сформулированы основные цели и задачи изучения морских берегов, их научная основа, описаны применяемые на практике методы исследований и особенности проведения работ.

**Ключевые слова:** динамика берегов; мониторинг; методы исследований; прогнозная оценка.

Берега и дно замерзающих морей России в последние десятилетия испытывают все возрастающее техногенное воздействие в связи с реализацией проектов по добыче, сжижению и транспорту газа. Строительство инженерных объектов в прибрежно-шельфовой зоне требует достоверной оценки рисков, предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с динамикой берегов и развитием сопряженных экзогенных процессов. Решение подобных задач предполагает получение необходимых сведений для проектирования объектов производственной и транспортной инфраструктуры, обеспечения промышленной и экологической безопасности на различных этапах строительства и эксплуатации инженерных сооружений, защиты территорий населенных пунктов, расположенных на берегах.

Около половины протяженности береговой линии в Арктической зоне РФ сложено многолетнемерзлыми дисперсными грунтами и подвержено воздействию деструктивных экзогенных (криогенных) процессов. Многие из этих процессов представляют угрозу хозяйственной деятельности и инженерным объектам и относятся к категории опасных. Это термоэррозия, термокарст (в т.ч. просадки поверхности дна), ледовая эрозия дна, термоденудация и термоабразия, связанная с таянием льдистых грунтов на берегах и последующей переработкой морским волнением. С начала XXI в. на фоне глобального потепления эти природные процессы заметно активизировались, они могут существенно осложнить хозяйственное освоение побережья и шельфа и представлять непосредственную угрозу производственной деятельности.

Предупреждение и ликвидация последствий деятельности опасных береговых процессов являются сложной задачей, для решения которой применяется комплексный научно-технический подход. Наиболее полные

данные о развитии береговых процессов получают в ходе литодинамических исследований и мониторинга динамики берегов. Целью таких работ является получение количественных характеристик береговых процессов, необходимых для проектирования, обеспечения надежности (эффективности) эксплуатации сооружений и оценки их влияния на морфологию и динамику береговой зоны сопряженных участков.

Инженерное значение исследований заключается в оценке возможных деформаций рельефа береговой зоны и дна в период эксплуатации сооружений. Это необходимо для определения граничных условий безопасной эксплуатации при выборе проектных решений (выбор участка размещения, типа основания (фундамента), заглубления, инженерной защиты и пр.) и оценки влияния сооружений на морфологию и динамику берега и дна в случае нарушения условий вдольберегового транспорта наносов, изменении положения береговой линии, рельефа дна и пр. При этом учитывается результат деятельности всего комплекса процессов и явлений, включая гравитационные, склоновые, мерзлотные, эрозионные процессы, штормовые нагоны, техногенное воздействие и многое другое.

Основными результатами работ, как правило, являются установленные максимальные и среднемноголетние скорости разрушения береговых уступов и изменения положения береговой линии (отступание или выдвижение), оценка динамики несвязных наносов (заносимость, размыв), величины изменения профиля подводного склона и берегового уступа в результате размыва или аккумуляции, глубина проникновения киля ледяных образований в грунт, эффективность берегозащитных конструкций и пр. Прогноз деформации берегов и дна позволяет минимизировать риски возникновения чрезвычайных ситуаций и нежелательные последствия строительства для природной среды, разрабатывать рекомендации по защите территорий, зданий и сооружений.

Организация мониторинга динамики берегов и сопряженных экзогенных процессов выполняется на основании целевой программы, разработка которой осуществляется для каждого конкретного объекта. Содержание программы определяется техническими характеристиками объекта и существующими природными условиями, в соответствии с которыми и формируются задачи исследования, система применяемых методов, подбирается оборудование и технология выполнения работ, обосновывается структура наблюдаемых параметров, периодичность наблюдений и функционирование всей системы мониторинга. Одними из важнейших результатов, наряду с фактической оценкой состояния компонентов геологической среды и получением всех необходимых сведений, являются рекомендации по предупреждению и предотвращению неблагоприятных и чрезвычайных событий геологического и техногенного характера. Подобные рекомендации, основанные на анализе всех факторов устойчивости природно-технических геосистем и региональном опыте строительства, способны существенно снизить стоимость создания и эксплуатации объекта и предотвратить экологический ущерб.

В число основных задач мониторинга на этапе проектирования входят выявление опасных процессов и их характеристика, организация сети мониторинга (профили, площадки и пр.) и количественная оценка динамики берега, предварительный прогноз (ориентировочный, качественный) развития опасных процессов, выработка рекомендаций для строительства, в т.ч. по минимизации воздействия на окружающую среду. На этапах строительства и эксплуатации сооружений большую роль в развитии экзогенных процессов начинает играть техногенный фактор, особенно на участках непосредственного производства строительных работ – выемка грунта, нарушения поверхностного стока, уничтожение почвенно-растительного покрова и пр. В связи с этим производственный мониторинг направлен, прежде всего, на оценку влияния строительства на развитие береговых процессов, оборудование дополнительных полигонов, сетей мониторинга и количественную оценку динамики берега при помощи инструментальных измерений. Разработка прогноза (детального, количественного) развития берега ведется с учетом влияния строительства на весь период эксплуатации сооружений, при необходимости вырабатываются рекомендации по защите инженерных объектов, предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

С целью снижения негативного влияния промышленной и хозяйственной деятельности на компоненты геологической среды должна осуществляться программа мониторинга с учетом всех аспектов рационального природопользования, учитывая природные закономерности развития и факторы устойчивости уязвимых к внешнему воздействию береговых систем. Для исключения возможных рисков и опасностей, связанных с береговыми процессами и устойчивого функционирования береговой инфраструктуры необходимо всестороннее изучение причин и механизмов развития береговых процессов, их прогнозирование, и на основе этого – грамотное проектирование и ведение строительных работ с учетом всех возможных негативных последствий для природной среды и способов их минимизации.

*Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 22-17-00097. При подготовке материалов также использованы результаты многолетнего мониторинга динамики берегов и дна арктических морей России, полученные ранее в ходе госбюджетной темы НИР лаборатории геоэкологии Севера географического факультета МГУ № 121051100167-1.*

**A.A. Ermolov, S.A. Ogorodov**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, ermolov@geogr.msu.ru

**MONITORING THE DYNAMICS OF THE SHORES AND BOTTOM OF  
THE FREEZING SEAS AS A BASIS FOR ENSURING ENVIRONMENTAL  
AND GEOTECHNICAL SAFETY OF ENGINEERING FACILITIES**

**Abstract.** The basic principles and methodological approaches to monitoring the dynamics of the shores and bottom of the freezing seas at the stages of design, construction and operation of engineering facilities of the oil and gas complex are considered. The main goals and objectives of the study of the seashores, their scientific basis are formulated, the research methods used in practice and the specifics of the work are described.

**Key words:** coastal dynamics; monitoring; research methods; predictive assessment.

**Рыбалко А.Е.<sup>1,2,3</sup>, Локтев А.С.<sup>4</sup>, Спасский Я.Б.<sup>5</sup>, Абросимов И.В.<sup>6</sup>,  
Алешин М.И.<sup>7</sup>, Беляев П.Ю.<sup>3</sup>, Захаров М.С.<sup>3</sup>, Кондратенко А.В.<sup>3</sup>,  
Кудинов А.А.<sup>3</sup>, Токарев М.Ю.<sup>8</sup>, Щербаков В.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ООО «Морской центр», г. Москва, info@mor-center.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра геоморфологии,  
г. Санкт-Петербург, secretary.earth@spbu.ru

<sup>3</sup>ВНИИОкеангеология, г. Санкт-Петербург, okeangeo@vniiio.ru

<sup>4</sup>ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва, info@marine-rc.ru

<sup>5</sup>АО «Талтек», г. Москва, info@taltek.net

<sup>6</sup>ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва, info@sc-lmsu.com

<sup>7</sup>ООО «Сплит», г. Москва, info@split-k.com

<sup>8</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, dean@geol.msu.ru

## **ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА И РОЛЬ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ИХ ИЗУЧЕНИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**Аннотация.** В публикации, на основании результатов проведения геолого-геофизических работ в Кандалакшском заливе Белого моря, обсуждаются вопросы использования геофизических (сейсмоакустических) методов для решения задач оценки грунтов участка морского дна и получения необходимой информации при минимизации общих затрат на производство работ. Рассматривается комплекс работ, включающий в себя сейсмоакустическое профилирование, гидролокацию бокового обзора, колонковый пробоотбор, набортные экспресс-методы и исследования физико-механических свойств грунтов в стационарной лаборатории. Показана важность изучения архивных материалов и сопоставления их с полученными в настоящее время данных. Использованный комплекс методов позволил наиболее эффективным образом организовать весь процесс геологоразведочных работ, минимизировать необходимые временные и трудовые затраты и предоставить заказчику всю необходимую информацию для решения задач для целей проектирования по развитию портовой инфраструктуры, при этом сейсмоакустические методы сыграли важнейшую роль в характеристике и оценке условий залегания разновозрастной и сложно построенной грунтовой толщи.

**Ключевые слова:** Кандалакшский залив; сейсмоакустическое профилирование; гидролокация бокового обзора; грунтовый пробоотбор; физико-механические и прочностные свойства донных грунтов; четвертичные отложения.

Задачей инженерно-геофизических исследований и пробоотбора в районе проектируемого объекта являлась специализированная стратификация геологического разреза на основе изучения физико-механических свойств донных грунтов, слагающих этот разрез. Естественно, детальность изучения инженерно-геологических условий таких объектов существенно зависит от их назначения и площадных размеров. Максимально полноценный комплекс работ с бурением и большим комплексом полевых и лабораторных исследований требуется для гидротехнического строительства на шельфе, в частности, для обоснования постановки буровых платформ. Однако в случае если объект предполагает заглубление на небольшую глубину в толщу осадков, а также и

габариты его не слишком велики, надежное и достаточное обоснование характеристик грунтов требует меньших затрат, а прямые методы изучения грунтовой толщи возможно заменять геофизическими методами. Существующие в настоящее время различные системы сейсмического профилирования позволяют изучать грунтовую толщу на всю мощность с различной детальностью. Определяющим показателем здесь выступает частота излучения сигнала и его мощность.

Для подобного рода работ обычно используются малые суда с ограничением возможности глубинного пробоотбора, особенно при наличии в разрезе плотных грунтов. В этих условиях геофизические методы позволяют не только оконтурить выходы на поверхность морского дна разновозрастных отложений, но и наиболее рациональным способом планировать и проводить целевой пробоотбор. Большую роль при этом приобретает изучение архивов (отчетов более ранних лет, публикаций и т.д.), в которых приводятся данные по физико-механическим свойствам грунтов, слагающих разрез в районе исследований. Это позволяет на ранней стадии разработать предварительную схему инженерно-геологической стратификации и корректно сформулировать вопросы предстоящих исследований.

В публикации приведены варианты возможного использования сейсмоакустических методов для решения поставленных задач инженерно-геологического изучения толщи грунтов на примере проведения морских геолого-геофизических работ для оценки грунтовых условий в акватории рейдовой стоянки в Кандалакшском заливе Белого моря.

Работы выполнялись в узкой части залива, носящей название «Кандалуха», напротив губы Княжая (рис. 1).

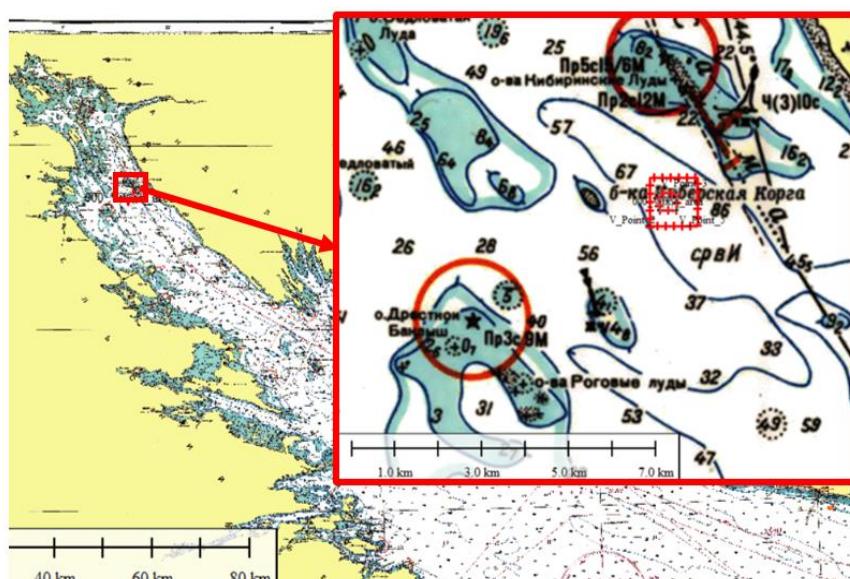


Рис. 1. Схема района работ. В увеличенном квадрате показано местоположение-проведения работ. Внешний красный прямоугольник – район работ. Внутренний квадрат – полигон исследований

Район отличается изрезанным рельефом морского дна с глубинами 60–80 м. Отмечается большое количество подводных поднятий, часть из которых выходит на поверхность воды в виде «луд» (каменистых отмелей) или «баклышей» (выходов, оглаженных ледником кристаллических пород).

Характерной чертой данного района является наличие периодических по времени полусуточных приливов и отливов, которые меняют уровень воды в среднем на 2 м и создают течения, изменяющие направление и скорость, особенно в узостях, которые присутствуют вдоль северного берега. Сам участок работ представляет, по существу, узость между двух луд. Это обуславливает особое внимание к способам привязки, а также нередко требует двойного и даже тройного пробоотбора в точках исследования.

### *Методика проведения геолого-геофизических работ*

Инженерно-геофизические исследования выполнялись за один проход научно-исследовательского судна следующим комплексом методов: 1) гидролокация бокового обзора (ГЛБО), 2) сейсморазведка сверхвысокого разрешения (ССВР). Для проведения ССВР использовался аппаратно-программный комплекс SplitMultiSeis, включающий в себя многоканальную аналоговую сейсмическую косу SplitMultiSeisstreamer16ch, электроискровой источник упругих волн SplitMultiSeissparker, систему синхронизации и сбора данных. Для обеспечения работы электроискрового источника использовался накопитель энергии SplitMultiSeisSource5000 НР. Основные параметры использованной аппаратуры: количество электродов – 400 шт., энергия импульса – 2500 Дж, частота возбуждения – 1 Гц, заглубление источника и приемника – 60 см.

ГЛБО проводилась с целью оценки характера поверхности морского дна и выявления на нем крупных объектов природной и, возможно, техногенной природы. Для проведения работ использовался ГЛБО марки Klein 3900 с шириной обзора  $2 \times 100$  м. Результаты профилирования выполнялись в виде мозаики, собранной в результате обработки геофизических данных.

Задачами грунтового пробоотбора были: определение стратификации разреза рыхлых (четвертичных) отложений и отбор проб для изучения состава и физико-механических свойств донных грунтов. Он выполнялся гравитационной трубкой внешнего диаметра 127 мм, длиной 3 м и общим весом устройства 300 кг.

Использованное для работы малое специализированное судно «Профессор Зенкович» и набор методов обеспечили достаточно низкий уровень затрат для проведения работ, которые были переданы заказчику для планирования проведения инженерных изысканий в соответствии с нормативными техническими документами (НТД).

Участок работ имел прямоугольную форму со стороной 400 м. Первоначальным проектом предусматривалось проведение сейсмоакустического профилирования по сторонам этого прямоугольника и

дополнительно выполнение двух секущих диагоналей. Пробоотбор предполагалось выполнить по углам прямоугольника и в центре его на пересечении двух секущих геофизических профилей (рис. 2). Однако предварительный анализ сейсмограмм показал, что в ряде случаев, проектные точки располагались в зоне распространения плотных грунтов с большим количеством валунов и щебня на поверхности морского дна, что делало пробоотбор колонковым гравитационным пробоотборником невозможным. Поэтому их положение было скорректировано. Этот факт указывает на необходимость использования сейсмоакустических методов на предварительной стадии проведения работ.

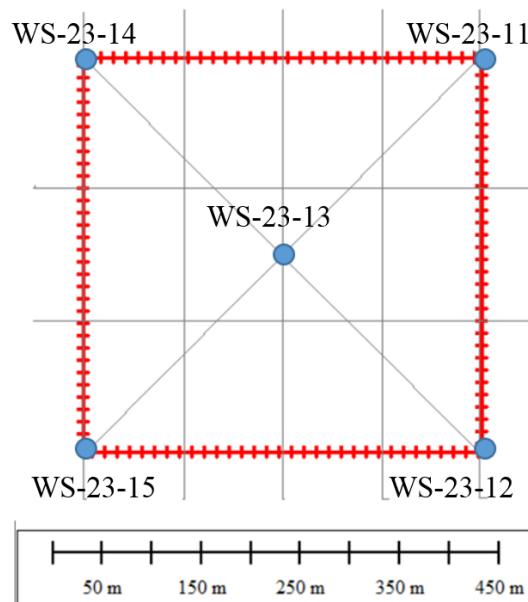


Рис. 2. Схема проектного расположения станций грунтового пробоотбора и геофизических профилей (серые линии) на участке работ

На борту судна проводились: 1) документация и описание поднятых грунтовых колонок, 2) отбор монолитов и проб нарушенного сложения для лабораторных исследований в стационарных условиях, 3) экспресс определение прочностных свойств (сопротивление недренированному сдвигу/срезу) донных грунтов с помощью микрокрыльчатки и микропенетрометра, 4) определение плотности грунта методом режущего кольца, 5) отбор проб в бюксы для определения природной влажности.

Лабораторные работы были выполнены в стационарной грунтовой лаборатории АО «АМИГЭ» в г. Мурманске. Были выполнены следующие определения: влажности и плотности грунта; пределов текучести и расскатывания; плотности частиц грунта, гранулометрического состава, сопротивления недренированному сдвигу, характеристик сжимаемости, относительного содержания органического вещества методом прокаливания.

Все определения выполнялись по действующим нормативным техническим документам.

### *Результаты выполненных работ*

На первом этапе работ были выполнены сейсмоакустическое профилирование для оценки геологического разреза четвертичных отложений и выявления мест выхода на поверхность морского дна разновозрастных сейсмостратиграфических горизонтов. Следует отметить, что рыхлый покров Кандалакшского залива Белого моря достаточно хорошо изучен сейсмоакустическими методами. В основании его практически везде присутствуют ледниковые отложения, которые залегают непосредственно на кристаллическом фундаменте. На сейсмограммах они характеризуются неслоистым хаотичным типом волновой картины и имеют резко изменчивую мощность. Выше залегает толща надледниковых отложений мощностью до 10–12 м, в которой по данным ССВР и полевого пробоотбора выделяют ледниково-озерные, ледниково-морские и морские отложения. Для первых характерен слоистый тип сейсмозаписи, который отвечает текстурным особенностям коррелятивных отложений. Морские отложения, представленные глинистыми и алевритистыми илами, на сейсмограммах выглядят прозрачными иногда с намечающейся слоистостью. Все эти отложения хорошо заметны и на других полученных сейсмограммах (рис. 3).

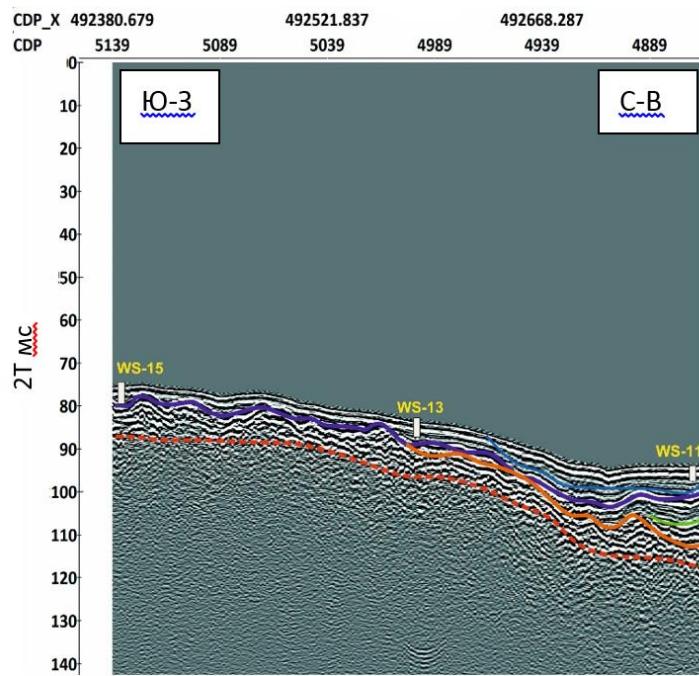


Рис. 3. Профиль WS-15–WS-11. *Обозначения:* фиолетовая линия – подошва голоценовых нефелоидных илов; голубая линия – рефлектор, разделяющий нефелоидные илы верхне-среднего от нижнего голоцена; коричневая линия – кровля морены; красный пунктир – кровля кристаллического фундамента

Так, на секущем по диагонали участке работ сейсмопрофиле от станции WS-15 до станции WS-11 (см. рис. 3), отражающем пологий спуск по глубине (от уровня поверхности воды) от 52 до 67 м отмечается возрастание мощности четвертичных отложений от 3 до 15 м. При этом по данным интерпретации сейсмических данных разрез в юго-западной части полигона исследований представлен только моренными отложениями, перекрытыми морскими илами, а на северо-востоке, во впадине, разрез надледниковых отложений представлен последовательно ледниково-озерными проксимальными, ледниково-морскими слоистыми глинами и морскими илами. Ледниковые отложения просматриваются на всем профиле, облекают доледниковый рельеф и имеют мощность от 5 до 9 м. Профиль заверен тремя трубками длиной до 2,5 м, которые вскрыли только толщу морских илов, состоящую из двух слоев, однородных в инженерно-геологическом отношении, т.е. представленную однородными текуче-пластичными и текучими (с поверхности) илами. Мощность их колеблется от 2 до 5 м.

Подобная картина прослежена и на других профилях. Только на субмеридиональных профилях в западной части участка выявлена пологая гряда, сложенная моренными отложениями, с превышением 10–12 м, вероятно, ледникового происхождения. Дно практически повсеместно сложено нефелOIDНЫМИ илами голоценового возраста (выше фиолетовой границы) мощностью 3–6 м. В пределах гряды мощность моренных образований сокращается до 1 м, а в ее северной части они практически выходят на поверхность морского дна. Характерно, что именно здесь, по данным ГЛБО на донной поверхности зафиксировано большое количество валунов, которое говорит о формировании поверхностных осадков в условиях размыва или транзита обломочного материала.

Таким образом, геологическими данными обеспечена только верхняя толща осадков, для нее же получен полный набор инженерно-геологических характеристик по данным набортных и лабораторных исследований. В силу ограниченности возможностей гравитационного пробоотбора для данного типа разреза (не более 2,1–2,5 м) особое значение для расширения характеристики состава и свойств выделенных грунтов имело изучение архивных материалов. К тому же ледниковые отложения на морском дне практически аналогичны таковым на прилежащей суше, где они вскрыты и изучены при проектировании и строительстве различных объектов в пределах Балтийского щита. Кроме того, весь спектр отложений в достаточной степени был исследован с получением характеристик физико-механических свойств грунтов при проведении работ в Онежском и Кандалакшском заливах Белого моря сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского.

Эти данные позволяют в полной мере использовать метод геологических аналогий для прогнозирования характеристик физико-механических свойств отложений, не затронутых прямыми исследованиями.

### *Обсуждение результатов работ*

По результатам полевых работ и лабораторных исследований были вскрыты две разновидности грунтов – илы глинистые с примесью органического вещества, оливково-серые и светло-серые. В соответствии с ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний» [1] выделенные илы могут быть объединены в один инженерно-геологический комплекс, который характеризуется низкими прочностными и деформационными свойствами. Полученная информация позволяет охарактеризовать изученный участок с позиций обустройства здесь якорной стоянки и выполнить проектные расчеты удерживающей силы якорных устройств.

Характеристика отложений, подстилающих комплекс илов, дана по фондовым данным и результатам ранее выполненных научно-производственных исследований на акватории Белого моря и прилегающей суще.

Полевые работы заняли три дня, включая достаточно длительные подход и отход, которые в каждом случае составляли до восьми часов. Работы проводились в одну смену, при этом следует подчеркнуть, что кратковременность работ и наличие спальных мест на судне позволяет организовывать в случае необходимости работы в две смены.

### *Заключение*

Необходимо подчеркнуть, что при постановке конкретных технических задач в ряде случаев вполне возможно заменить дорогостоящие регламентированные НТД инженерно-геологические изыскания менее дорогостоящими, но не менее эффективными комплексными геолого-геофизическими работами, что позволит распространить полученный опыт на северные моря с их кратким безледным периодом. Это может иметь существенный экономический эффект, а также позволит организовать качественную оперативную подготовку перед проведением инженерных изысканий в соответствии с действующими НТД: уточнить программу работ, расположение будущих геологических выработок, что существенно увеличит детальность изысканий и сэкономит как выделяемые средства заказчика, так и время проведения работ.

### *Список литературы*

1. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции  
«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

**A.E. Rybalko<sup>1,2,3</sup>, A.S. Loktev<sup>4</sup>, Ya.B. Spassky<sup>5</sup>, I.V. Abrosimov<sup>6</sup>, M.I. Aleshin<sup>7</sup>,  
P.Yu. Belyaev<sup>3</sup>, M.S. Zakharov<sup>3</sup>, A.V. Kondratenko<sup>3</sup>, A.A. Kudinov<sup>3</sup>,  
M.Yu. Tokarev<sup>8</sup>, V.A. Shcherbakov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Marine Center LLC, Moscow, info@mor-center.ru

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, earth@spbu.ru

<sup>3</sup>VNIIOkeangeologia, Saint Petersburg, okeangeo@vniio.ru

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC, Moscow, info@marine-rc.ru

<sup>5</sup>Taltek JSC, Moscow, info@taltek.net

<sup>6</sup>Lomonosov Moscow State University Seismic Data Analysis Center LLC, Moscow, info@sc-lmsu.com

<sup>7</sup>Split LLC, Moscow, info@split-k.com

<sup>8</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, dean@geol.msu.ru

## **ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS OF THE KANDALAKSHA BAY AND THE ROLE OF GEOPHYSICAL METHODS IN THEIR STUDY FOR THE PURPOSES OF DESIGNING MARINE TRANSPORT INFRASTRUCTURE FACILITIES**

**Abstract.** The article, based on the results of specific geological and geophysical work in the Kandalaksha Bay of the White Sea, discusses the use of geophysical (seismoacoustic) methods to solve the problem of assessing the soils of a section of the seabed and obtaining the necessary information while minimizing the overall costs of work. A set of works is considered, including seismic-acoustic profiling, side-scan location, core sampling, on-board express methods and studies of the physical and mechanical properties of soils in a stationary laboratory. The importance of studying archival materials and comparing them with currently obtained data is shown. The importance of studying archival materials and comparing them with currently obtained data is shown. The set of methods used made it possible to organize the entire process of geological exploration in the most efficient way, to minimize the necessary time and labor costs, and to provide the customer with all the necessary information to solve specific problems in the development of port infrastructure, while seismoacoustic methods played a crucial role in characterizing and assessing the conditions of occurrence of rocks of different ages and complex constructed soil layer.

**Key words:** Kandalaksha Bay; seismoacoustic profiling; side-scan sonar; soil sampling; physical, mechanical and strength properties of bottom soils; quaternary sediments.

**Терехина Я.Е.<sup>1</sup>, Токарев М.Ю.<sup>1</sup>, Понимаскин А.И.<sup>2</sup>, Яковенко А.Д.<sup>1,2</sup>,  
Горбачев С.В.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, mjtokarev@gmail.com

<sup>2</sup>ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва

<sup>3</sup>ООО «РН-Шельф-Арктика», г. Москва

## **ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА 3D СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ПЕЧОРСКОГО МОРЯ**

**Аннотация.** В ходе освоения Арктического региона наиболее актуальным на данный момент является изучение мелководных районов шельфа. На начальной стадии хозяйственного освоения необходимо проведение этапа территориального планирования. При этом обязательным является анализ опасных геологических процессов и явлений верхней части разреза в соответствии с СП 504.1325800.2021 «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования». Максимальное покрытие зон интересов имеют данные 3D сейсморазведки. В данной работе рассмотрены возможности адаптации этих данных для изучения верхней части разреза на примере Печорского моря.

**Ключевые слова:** 3D сейсморазведка; специализированная обработка; гидрофоны ближней зоны; верхняя часть разреза; опасные геологические процессы и явления; Печорское море.

При применении стандартной сейсморазведки для анализа первых 1000 м есть ряд очевидных недостатков: низкие разрешающая способность и кратность. Глубина воды акватории накладывает дополнительные ограничения: в районе работ она колеблется от 12 до 25 м. Однако, при применении специализированной обработки можно получить полноценную информацию об опасных геологических процессах и явлениях на участке исследования.

Стандартный граф обработки данных сейсморазведки предполагает применение большого числа процедур, которые могут негативно сказываться на волновой картине верхней части разреза, искажать амплитуды и геометрию границ в верхней части разреза. Такими процедурами являются: поверхностно-согласованные амплитудные поправки, деконволюция. Также могут появляться артефакты после применения многоканальных процедур шумоподавления (такие как преобразование Радона и т.д.), поскольку на малых временах кратность отражений крайне мала. Поэтому специализированная обработка данных должна производиться отдельно от основной обработки и не должна содержать процедур, искажающих отражения в верхней части разреза.

Ниже предложены виды результатов обработки и последовательности интерпретации данных стандартной 3D сейсморазведки для анализа верхней части разреза. Так, например, для определения опасностей вдоль ствола скважины от 400 до 1000 м возможно использовать данные после стандартной обработки. А для анализа интервала от 0 до 100 м могут быть использованы обработанные данные с гидрофонов ближней зоны (табл.).

Таблица

Схематическое представление последовательности обработки и интерпретации

Обработка	Исходные данные 3D СР								Результат	
	Стандартная обработка	Специализированная обработка для интервала по грунту 100-1000 м. Буксируемые косы (выносы до 2000 м, время до 1500 мс)			Специализированная обработка для интервала по грунту 0-100 м. Ближние выносы, датчик ближней зоны, буксируемые косы (выносы до 3000 м, время до 7000 мс)					
	Куб «структурный»	Куб «структурный»	Куб «динамический»	Куб «высокого разрешения»	Временные разрезы ближних выносов. Куб ближних выносов	Временные разрезы датчика ближней зоны. Куб датчика ближней зоны	Атрибуты до суммирования	Скоростные разрезы Vs (MASW). Куб VS (SWT)		
Подготовительная работа	Формирование интерпретационного проекта. Анализ региональной геологической информации. Анализ инженерно-геологических условий								Структурные карты. Трассирование тектонических нарушений.	
Интерпретация	Структурная интерпретация	Корреляция горизонтов 400-1000 мс. Стратиграфическая привязка. Анализ кинематических атрибутов. Анализ когерентности.	Корреляция горизонтов 150-400 мс. Стратиграфическая привязка. Анализ кинематических атрибутов. Анализ когерентности.				Корреляция горизонтов 0-150 мс. Стратиграфическая привязка. Анализ кинематических атрибутов. Анализ когерентности.			
Анализ скоростей	Vp (МПВ)	Vp (ОГТ)			Vs (MASW, SWT)				Выделение ОГПиЯ. Ранжирование ОГПиЯ. Рекомендации.	
Динамическая интерпретация		Анализ частотно-временных трансформант. Анализ динамических атрибутов. AVO-анализ.			Анализ частотно-временных трансформант. Анализ динамических атрибутов.					
Последовательная акустическая инверсия	Акустическая инверсия	Акустическая инверсия			Акустическая инверсия					

Примечание: МПВ – метод преломленных волн; ОГТ – метод общей глубинной точки; MASW – многоканальный анализ поверхностных волн; SWT – метод поверхностно-волновой томографии; ОГПиЯ – опасные геологические процессы и явления.

С помощью большого объема доступных материалов на территории Баренцево-Карского шельфа, в т.ч. акватории Печорского моря, была разработана методика специализированной обработки и комплексной интерпретации данных 2D/3D сейсморазведки с данными инженерно-геологических изысканий для изучения строения верхней части разреза и поиска опасных геологических процессов и явлений. Данная технология актуальна на этапе территориального планирования с целью оценки геологических условий и выбора наиболее оптимальных участков для поисково-разведочного бурения и строительства для последующего освоения.

### Список литературы

1. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования.

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции  
«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

**Y.E. Terekhina<sup>1</sup>, M.Yu. Tokarev<sup>1</sup>, A.I. Ponimaskin<sup>2</sup>, A.D. Iakovenko<sup>1,2</sup>,  
S.V. Gorbachev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, mjtokarev@gmail.com

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University Seismic Data Analysis Center LLC, Moscow

<sup>3</sup>RN-Shelf-Arctic LLC, Moscow

## **3D SEISMIC DATA ANALYSIS TECHNOLOGIES FOR STUDYING THE UPPER PART OF THE GEOLOGICAL SECTION IN THE ARCTIC SHELF SHALLOW AREAS**

**Abstract.** The study of the shallow-water areas is the most relevant process for the Arctic region development. Territorial planning must be carried out at the initial stage of management activity. At the same time, the near-surface geohazards analysis is mandatory. 3D seismic data provide the best coverage of areas of interest. The ways of the Pechora Sea data adoption for the near-surface are considered in this report.

**Key words:** 3D seismic surveys; specialized processing; near field hydrophones; near-surface; geohazards.

## СЕКЦИЯ «ГЕОТЕХНИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ: ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА И СОХРАНЕНИЕ ПАМЯТНИКОВ»

**Евенкова Т.Д., Бурлуцкий С.Б., Лаздовская М.А., Карам Ж.С.**

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, tatyana.evenkova@yandex.ru

### ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОКОВ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

**Аннотация.** При воздействии постоянных электрических токов на глинистый грунт возникают электрокинетические процессы. Изменения свойств и структуры грунтов при возникновении электрокинетических процессов общеизвестны, данные явления широко применяются в технической мелиорации, в строительстве, в инженерной геологии и т.д. Однако при организации катодной защиты трубопроводов не учитывается электропреобразование грунтов. Учитывая опасность эксплуатации трубопроводов, необходимо изучать изменение структуры грунта в целом для предотвращения ухудшения свойств среды вокруг подземных конструкций. В данной работе исследуется влияние токов катодной защиты на структуру глинистого грунта в недренированных условиях. Исследование проводилось с помощью экспериментальной установки, моделирующей катодную защиту. По окончанию эксперимента изучались грунты ненарушенного строения вблизи катода, где были выявлены структурные преобразования грунта на макро-, мезо- и микроуровнях. Дополнительно к этому, отмечается изменение реологических и физических свойств, гранулометрического состава и pH поляризованного глинистого грунта.

**Ключевые слова:** катодная защита; структура грунта; электрокинетические процессы; изменение свойств.

#### *Введение*

Эксплуатация подземных металлических сооружений всегда сопровождается рисками возникновения отказов по причине коррозионных процессов. Для борьбы с коррозией используют электрохимическую защиту трубопроводов, в т.ч. и катодную поляризацию, которая применяется на протяжении всего срока эксплуатации сооружения (более 10 лет). Однако при организации катодной защиты не учитывается влияние токов на грунт, особенно при скоплении воды рядом с трубопроводом. Так, при понижении плотности тока в результате упрочнения грунта в анодном пространстве и миграции электроосмотической воды в сторону трубопровода, могут создаваться условия, благоприятствующие дальнейшему протеканию коррозионных процессов. В зависимости от множества факторов среды в околоскатодном пространстве может происходить ухудшение свойств и преобразование структуры грунта, вследствие чего может повышаться коррозионная агрессивность и формироваться техногенно-измененный грунт.

Целью данного исследования является оценка изменения структуры глинистого грунта под действием токов катодной защиты трубопроводов.

### *Материалы и методы исследования*

Отбор монолита кембрийской глины ненарушенного строения производился на оползневом склоне левого берега р. Тосны.

Для целей имитации работы катодной защиты была собрана экспериментальная установка, которая состояла из следующих элементов: стеклянный цилиндр диаметром 13 см, высотой 30 см, в который помещался монолит; стальные электроды (диаметр 12,8 см; толщина около 1 мм); источник постоянного тока (лабораторный блок питания QJ6005E); соединительные линии (медные провода). Использование цилиндра в качестве пространства, включающего систему «анод – грунт – катод», было необходимо для создания недренированных условий среды.

Поляризация образца производилась в течение 57 дней. Выходное напряжение  $U$  составило 20 В. В течение первых трех дней эксперимента плотность тока  $j$  составила примерно  $5000 \text{ mA/m}^2$ , в дальнейшем был постепенный спад величины и на момент отключения установки было зафиксировано, что  $j = 1523 \text{ mA/m}^2$ .

В условиях ограниченных лабораторных исследований необходимо было выбрать такие значения, при которых за короткий срок возможно получение видимого результата. Помимо этого, половина отказов по причине внешней коррозии связано с «эффектом перезащиты», вызванного сильным смещением потенциала защищаемого сооружения в отрицательную сторону [5]. При «перезащите» трубопровода наблюдаются высокие значения плотности тока, в результате чего возможно ускорение электрокинетических процессов.

После проведения эксперимента были определены гранулометрический состав, физические свойства и водородный показатель pH экспериментальных (у катода) и исходного образцов. Помимо этого, был проведен ряд исследований в Научном парке Санкт-Петербургского государственного университета, где были получены: удельная поверхность, реологические свойства, изображения характера поверхности (электронный микроскоп), особенности порового пространства, его распределения и формы включений (рентгеновская микротомография).

### *Результаты исследования*

По окончанию поляризации глинистого грунта было отмечено формирование макрослоистости. Слой у катода (катод 1) был сухой и имел рыхлую структуру, слой выше (катод 2) был влажный, липкий и пластичный. На контакте катода и грунта была обнаружена большая концентрация выпавшего в осадок  $\text{Ca(OH)}_2$ . Формирование макрослоистости связано с особенностями установки и выбранными параметрами ведения эксперимента. Поскольку для эксперимента был выбран цилиндр, то внутри установки, скорее всего, было повышено пневматическое давление [2]. В результате увеличения давления в

системе, а также повышенного значения плотности тока, протекание электрохимических процессов происходило интенсивнее, чем это могло бы быть на объекте. Помимо этого, формирование рыхлого слоя у катода, возможно, связано с цементацией грунта, вследствие выпадения в осадок портландита  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , а также интенсивным выделением газообразного водорода.

В ходе анализа полученных данных был выявлен ряд изменений. Так, по сравнению с исходной глиной содержание глинистой фракции у катода 1 и 2 выросло на 7% и на 14% соответственно. Также отмечается повышение размера частиц, относящихся к песчанистой фракции, у катода 1% на 11%, у катода 2 на 2%. Влажность и пористость у катода 2 увеличилась на 6% и 2%, у катода 1 уменьшилась на 1%. Плотность грунта и плотность твердых частиц у трех образцов почти не отличается. Небольшие различия плотности сухого грунта объясняются изменением пористости. Среда у исходного грунта нейтральная, когда как у экспериментальных образцов – щелочная (рН для катода 2 равно 9,0, для катода 1 – 9,5). Полученные результаты по водородному показателю катодов 1 и 2 занижены, т.к. определение параметра проводилось не сразу после эксперимента, а бралась усредненная проба из каждого образца. На высокие значения рН во время поляризации указывает выпавший в осадок гидроксид кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . По сравнению с исходным образцом число пластичности у катода 2 снизилось на 6%, у катода 1 отмечено повышение значения на 8%. Удельная поверхность у исходного грунта составила  $37,96 \text{ м}^2/\text{г}$ , у катода 2 –  $35,63 \text{ м}^2/\text{г}$ , у катода 1 –  $42,20 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Исследование реологических характеристик показало, что предел текучести и точка течения для исходного грунта равны 719,57 Па и 12011,00 Па, для катода 2 – 610,26 Па и 12576,50 Па, для катода 1 – 1163,35 Па и 15515,50 Па. Так, при анализе данных было выявлено, что наиболее подверженным к разрушению является грунт у катода 2. Грунт у катода 1 характеризуется повышением структурной прочности. Согласно литературным данным, кембрийские глины имеют турбулентную микроструктуру [4]. Такая структура обычно характерна для сильно уплотненных сцепленных глин с пористостью менее 20%. Для глин с такой микроструктурой характерны фазовые контакты между минеральными частицами. Для авторского исследования монолит кембрийской глины отбирался из верхней части разреза, где отложения подвержены процессам выветривания. Помимо этого, полученные физические свойства для исходного грунта и литературные данные указывают на процесс разуплотнения глин с места отбора [1]. Поэтому, скорее всего, для исходной глины из проведенного эксперимента характерен смешанный тип контактов. Так, повышение структурной прочности глины у катода 1 возможно из-за частичного появления фазовых цементирующих контактов, в результате осаждения гидроксида кальция. Наибольшая подверженность глинистого грунта к разрушению у катода 2 происходила из-за преобладания переходного типа контактов. Особенность переходного типа контактов – это зависимость от влажности. Помимо этого, на структурную прочность мог повлиять механизм

самосборки микрочастиц. При увеличении влажности они могут «плавать» в межчастичном пространстве, а при высыхании собираются между минералами на краю мениска воды, тем самым повышая прочность структуры грунта [3].

Последующей частью исследования было выявление структурных отличий на микроуровне. Так, с помощью электронного микроскопа, было получено изображение поверхности для исходного грунта, микроагрегаты которого имели ориентированную листообразную форму. При увеличении разрешения у листообразного микроагрегата прослеживаются глинистые частицы пластинчатой формы, в которых наблюдаются контакты типа «базис – базис» и «базис – скол». Значительных изменений в микроструктуре грунта после поляризации не отмечается.

Поровое пространство микромонолитов с сечением  $1 \times 1$  см изучалось с помощью рентгеновской микротомографии. По всему объему и при разных сечениях микромонолита исходного образца наблюдаются закрытые поры. Максимальная ширина закрытой поры составляет около 0,5 мм. У катода 2 рассматривается уменьшение закрытых пор и увеличение сообщающихся пор, появившихся в результате электроосмотического процесса. Распределение открытых пор различно при сравнении сечений пробы катода 2. По всему микромонолиту у катода 1 наблюдается повышение трещиноватости глинистого образца. Данная трещиноватость может быть связана с усадкой грунта, которая возникла из-за его обезвоживания (влажность глины у катода 1 была меньше нижнего предела пластичности), а также разрыхлением структуры грунта в результате выделения газообразного водорода.

Значительные изменения выявлены при рассмотрении включений образцов. Включения в исходном образце имеют отчетливую форму круглообразных отдельностей. Наибольшие изменения в форме и количественном соотношении включений наблюдается в грунте взлизи катода 1. Большая часть представляет собой нитевидные образования, однако в некоторых участках сохраняются включения, характерные для исходного образца. Возможно, в результате перенапряжения и высоких значений pH происходило частичное растворение исходных включений и осаждение новых образований. У глинистого образца вблизи катода 2 наблюдается смешанный тип включений, как круглообразные отдельности, так и нитевидные образования.

## Выводы

Воздействие постоянных токов на грунт, в т.ч. токов катодной защиты, неизбежно ведет к электропреобразованию структуры грунта за счет протекания электроповерхностных явлений.

После поляризации образца в недренированных условиях в околодкатодном глинистом пространстве было выявлено формирование слоистости. Выделенные слои имели отличия по гранулометрическому составу, физическим свойствам и pH между собой и исходным грунтом. Образование слоев, свойства которых

различаются, неизбежно ведет к неоднородности грунта по удельному электрическому сопротивлению, что затрудняет работу катодной защиты подземных металлических конструкций и увеличивает опасность протекания электрохимической коррозии металла.

При анализе реологических свойств наблюдается снижение устойчивости структуры грунта у катода 2, в то время как у катода 1 структурная прочность повышается. Данная особенность связана с повышением цементирующих контактов глинистого грунта у катода 1 в результате выпадения в осадок гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

При сравнении микроструктуры исходного и экспериментальных образцов значительных изменений не выявлено. Наибольшие отличия отмечаются в поровом пространстве образцов у катода 2: наблюдается укрупнение и количественное увеличение сообщающихся пор, вследствие электроосмотической миграции воды; у катода 1: характерно уменьшение толщины открытых и повышение закрытых пор, что связано с цементацией грунта. Помимо этого, при помощи рентгеновской томографии было отмечено формирование трещиноватости по всему объему микромонолита вблизи катода 1. Кроме того, были получены изображения характера распределения и формы включений грунтов. Включения исходного грунта представляют собой круглообразные отдельности, в то время как вблизи катода 1 их доля уменьшается и проявляются тонкие образования нитевидной формы.

Рассмотренные параметры глины после поляризации указывают на появление в околоскатодном пространстве техногенноизмененных грунтов. Данные особенности необходимо учитывать при организации электрохимической защиты трубопроводов от коррозии.

## Список литературы

1. Дашко Р.Э., Волкова А.В. Геомеханический анализ коренных глин Санкт-Петербурга как трещиновато-блочной среды // Записки Горного института. 2004. Т. 156. С. 118–122.
2. Королев В.А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. М.: Сам полиграфист. 2015. 468 с.
3. Королев В.А. О так называемых «ионно-электростатических связях» в глинах и причинах упрочнения глин при высыхании // Грунтоведение. 2019. № 1(12). С. 27–38.
4. Соколов В.Н. Микромир глинистых пород // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 3. С. 56–64.
5. Хижняков В.И., Негодин А.В., Шелков В.А., Тоз А.Н. Предотвращение развития коррозионных и стресс-коррозионных дефектов на катоднозащищаемой поверхности магистральных трубопроводов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 1. С. 140–149. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-1-140-149>.

**T.D. Evenkova, S.B. Burlutskiy, M.A. Lazdovskaya, Zh.S. Karam**

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, tatyana.evenkova@yandex.ru

## **CHANGES IN THE STRUCTURE OF CLAY SOIL UNDER THE INFLUENCE OF CATHODIC PROTECTION CURRENTS**

**Abstract.** Electro-surface phenomena, including electrokinetic processes, occur during the action of currents on the ground. Changes in the properties and structure of soils in the event of electrokinetic processes are well-known and are used in technical improvement, in construction, engineering geology, etc. However, the organization of cathode protection of pipelines does not take into account the electrical transformation of soils. Given the risks of pipeline operation, it is necessary to study the changes in the structure of the ground as a whole in order to prevent deterioration of the environmental properties around underground structures. In this paper the influence of cathode protection currents on the structure of clay soil in undiagnosed conditions is investigated. The study was carried out using an experimental cathode protection simulator. At the end of the experiment, undisturbed soils near the cathode were studied, where structural transformations of the soil at macro, meso and micro levels were found. In addition, changes in rheological and physical properties, granulometric composition and pH of polarized soils have been observed.

**Key words:** cathodic protection; soil structure; electrokinetic processes; changes in properties.

**Суслин И.Р.<sup>1</sup>, Фоменко И.К.<sup>1</sup>, Мусаева Л.А.<sup>2</sup>**

РГГРУ имени Серго Орджоникидзе, гидрогеологический факультет, кафедра инженерной геологии,  
г. Москва, suslinir@mgri.ru, fomenkoik@mgri.ru

<sup>2</sup>АО «Мособлгидропроект», г. Дедовск, musaevala@hydropoject.com

## **СТОХАСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА**

**Аннотация.** Отсутствие полноты информации о составе, строении и свойствах литотехнических систем, о законах проходящих процессов, зачастую вызывает вопросы при строительстве объекта. Поскольку неопределенность тесно связана с понятием случайной величины и ее вероятностной природой, то для более достоверного решения инженерно-геологических задач необходимо использование стохастических расчетов. Цель публикации – продемонстрировать эффективность стохастического анализа при оценке устойчивости склона.

**Ключевые слова:** неопределенность; устойчивость склонов; стохастический анализ; случайный метод предельного равновесия (RLEM); корреляция.

### *Введение*

Используемые в инженерно-геологической практике традиционные подходы к количественной оценке устойчивости склонов ориентированы в первую очередь на определение положения в массиве поверхности с минимальными значениями коэффициента устойчивости ( $K_{уст}$ ) [8]. Получаемые при этом значения коэффициента устойчивости (или коэффициента запаса) отражают состояние склонового массива исключительно только на момент, когда грунты, слагающие массив, характеризуются показателями, принятыми в качестве исходных. При этом, предполагается, что прочностные характеристики грунтов точно известны, являются неизменными и однородными. Пространственная изменчивость свойств грунтов редко учитывалась непосредственно в традиционных анализах устойчивости. Традиционно, получаемые при количественной оценке устойчивости склонов детерминированные значения  $K_{уст}$  рассматриваются в качестве критерия оценки опасности развития оползневых смещений. Именно этот подход в настоящее время закреплен в действующих нормативных технических документах. Очевидно, что описанный «традиционный» подход не обеспечивает получение оценок вероятности развития/активизации оползневых процессов, более того, склоны с одинаковым коэффициентом устойчивости могут иметь различную вероятность развития оползневого процесса. В то же время, на развитие процессов и формирование физико-механических параметров грунтов оказывают широкое действие различные случайные факторы, т.к. геологический процесс не является полностью детерминированным [1].

Отсутствие полноты информации о составе, строении и свойствах грунтов, о механизмах проходящих процессов, зачастую вызывает вопросы при проектировании и строительстве объектов. Сбор, накопление и анализ данных,

как правило, сопровождаются ошибками измерения, искажающими скучную информацию об инженерно-геологических условиях, неоднозначностью использования той или другой математической модели или расчетной методики. Эти и многие другие факторы характеризуют неопределенность инженерно-геологических условий, в общем, и геотехнической модели, в частности [6].

Поскольку неопределенность тесно связана с понятием случайной величины и ее вероятностной природой, то для более достоверной оценки задач инженерной геологии необходимо рассчитывать не только детерминированную компоненту инженерно-геологического процесса, но и его случайную составляющую. Этот факт является мотивирующей силой к развитию вероятностных подходов в расчетах.

Ранее авторами [2–6] была показана возможность вероятностной количественной оценки устойчивости склонов. Особенностью вероятностных количественных оценок устойчивости склонов является использование в качестве исходных данных не скалярных величин, используемых при традиционном детерминированном подходе, а функции распределения свойств грунтов [7]. Однако, даже использование вероятностной методологии в расчетах не гарантирует достоверную оценку надежности. Необходимо сделать следующий шаг и перейти к стохастическому системному анализу, который объединяет детерминированный и вероятностный подходы и позволяет уменьшить степень неопределенности литотехнической системы ЛТС.

Цель статьи – продемонстрировать эффективность и необходимость стохастического анализа при оценке устойчивости склона.

### *Объект исследований*

В качестве объекта работ был выбран откос, расположенный на территории Кочубеевского района Ставропольского края. Местоположение объекта исследования показан на рис. 1.



■ расположение откоса плотины

Рис. 1. Расположение объекта исследования

Инженерно-геологические условия откоса плотины представлены сложными геологическим и гидрогеологическим строением. В геологическом строении участка инженерно-геологических изысканий на разведенную глубину 30 м принимают участие четвертичные отложения и нерасчлененные отложения верхнего палеогена (олигоцен)-нижнего неогена (миоцен) майкопской серии. Отложения представлены чередованием пачек глинистых грунтов. Подземные воды развиты в техногенных отложениях изучаемого откоса. На территории исследуемого объекта развиты эрозионные и оползневые процессы (рис. 2).

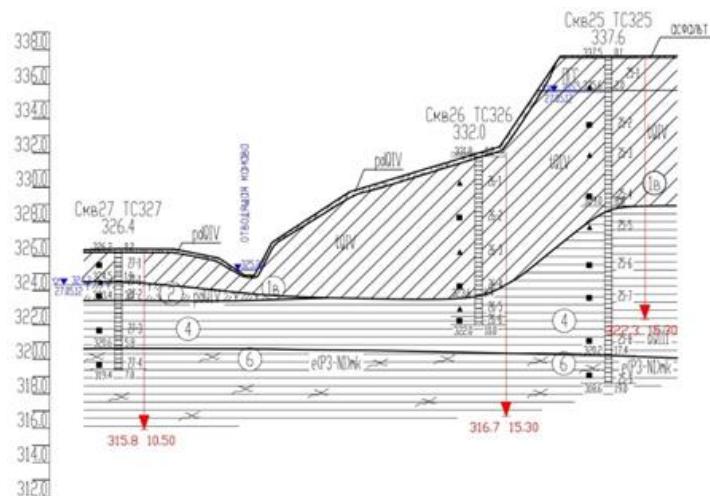


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез откоса

Послойный инженерно-геологический разрез откоса плотины представлен инженерно-геологическими элементами (ИГЭ):

- ИГЭ-1В – насыпь откоса – суглинками твердыми с включением гравия;
- ИГЭ-2 – почвенно-растительный слой – глиной полутвердой;
- ИГЭ-4, 6 – кора выветривания майкопских глин – глинами твердыми, трещиноватыми.

Вероятностные свойства грунтов, используемые при моделировании приведены в табл. 1.

Таблица 1  
 Физико-механических свойств грунтов

№ ИГЭ	Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Стандартное отклонение $\rho$	Угол внутреннего трения $\phi$ , °	Стандартное отклонение $\phi$	Сцепление грунта $c$ , МПа	Стандартное отклонение $c$
ИГЭ-1В	1,92	0,04	8,29	2,20	0,034	0,008
ИГЭ-2	1,74	0,04	6,78	2,20	0,022	0,008
ИГЭ-4	1,90	0,03	9,63	1,30	0,021	0,011
ИГЭ-6	1,76	0,10	8,29	3,39	0,018	0,011

### *Методы исследования*

Основная идея количественной стохастической оценки устойчивости склонов заключается в учете фактически наблюдаемой изменчивости факторов (их количественных показателей), учитываемых при расчете. В данном исследовании был использован метод случайного предельного равновесия (RLEM). RLEM – это относительно новый метод вероятностного анализа устойчивости склонов, в котором используется комбинация двумерной теории случайных полей и методов предельного равновесия [11].

Пространственная изменчивость свойств грунта при использовании данного подхода моделируется с помощью теории случайных полей [16], согласно которой в любой области ИГЭ свойства грунта являются случайной переменной, характеризующейся вероятностной функцией распределения и коррелирующей со значениями свойств грунта в смежных областях [10]. Она определяется на основе функции автокорреляции, которая может быть оценена по результатам измерений параметра в различных точках по результатам полевых или лабораторных испытаний [9] и вычислена помощью функции коэффициента корреляции Маркова:

$$R(\tau_x, \tau_y) = \exp\left\{-\sqrt{\left(\sqrt{\left(\frac{2\tau_x}{\theta_x}\right)^2 + \left(\frac{2\tau_y}{\theta_y}\right)^2}\right)}\right\}, \quad (1)$$

где  $R(\tau_x, \tau_y)$  – коэффициент автокорреляции,  $\tau_x$  и  $\tau_y$  – абсолютные расстояния между двумя точками в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно,  $\theta_x$  и  $\theta_y$  – корреляционные расстояния в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно [14].

В данном исследовании, при выполнении расчетов была рассмотрена величина корреляционного расстояния в горизонтальном и вертикальном направлении 10 м.

Как было показано в работе [15], учет пространственной неоднородности грунтов снижает степень неопределенности в ЛТС. При этом, корреляционные связи между различными факторами обычно не учитываются, и они рассматриваются как полностью независимые переменные. Однако, известно, например, что сцепление и угол внутреннего трения связаны. Эта связь может быть объяснена зависимостью прочностных свойств грунтов от их гранулометрического состава. Как правило, глинистым грунтам свойственны низкие значения угла внутреннего трения и повышенные значения сцепления, а супесчаные грунты, наоборот, имеют более высокие углы внутреннего трения и низкое сцепление.

В то же время, изменчивость гранулометрического состава и свойств грунтов будет наблюдаться и в пределах единого ИГЭ, а, следовательно, между прочностными показателями будет существовать обратная корреляция.

С целью оценить влияние корреляции между сцеплением и углом внутреннего трения на результаты оценки устойчивости склона, была выполнена серия расчетов с различными коэффициентами корреляции между прочностными параметрами ( $-0,1; -0,5; -0,6; -0,9$ ).

Оценка устойчивости проводилась с использованием метода Моргенштерна-Прайса [12], относящегося к классу методов предельного равновесия, в котором удовлетворяется общее равновесие моментов и сил. В расчетах была использована модель поведения грунтов Кулона – Мора, которая объединяет упруго-пластическое деформирование и линейный критерий прочности материалов. Влияние подземных вод (расчет порового и фильтрационного давлений) на устойчивость модельного склона выполнено с использованием метода конечных элементов.

### Результаты и обсуждения

Итоговая геомеханическая схема с результатами оценки устойчивости склона приведена на рис. 3.

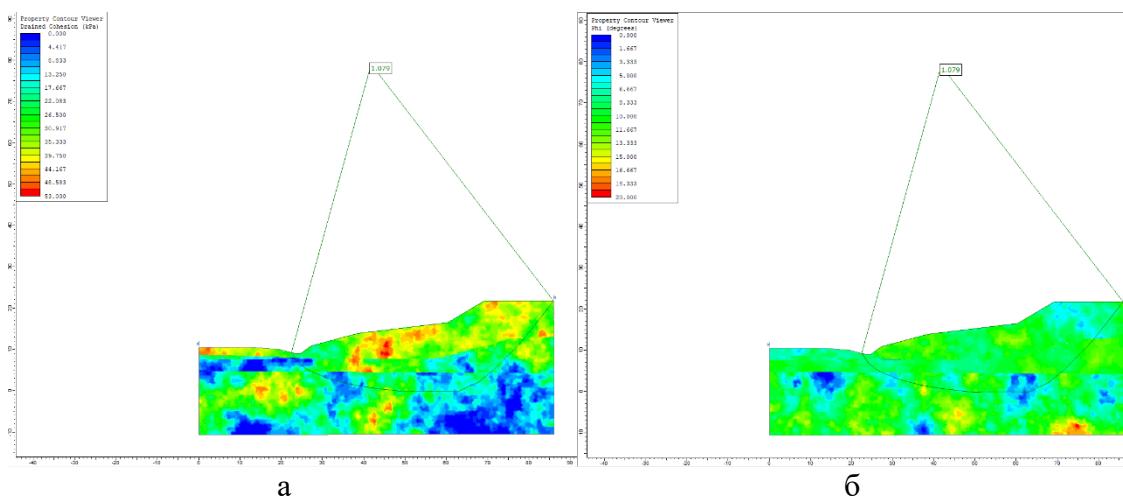


Рис. 3. Распределение сцепления в расчетной геомеханической схеме откоса при минимальном значении  $F_s = 1,079$  (а). Распределение угла внутреннего трения в расчетной геомеханической схеме откоса при минимальном значении  $F_s = 1,079$  (б)

В табл. 2 показаны результаты полученной количественной оценки устойчивости модельного склона. Видно, что при традиционном подходе к расчету устойчивости, основанном на детерминированном подходе, корреляция между свойствами учтена быть не может, а при использовании вероятностного анализа изменение коэффициента корреляции не влияет на полученные величины  $K_{уст}$  (табл. 2, столбец 3).

Таблица 2  
 Результаты оценки устойчивости модельного склона

Коэффициент корреляции	Детерминированный $K_{уст}$	Среднестатистический $K_{уст}$	Вероятность потери устойчивости, %	Индекс надежности
1	2	3	4	5
0	1,14	1,008	44,0	0,10
-0,1	1,14	1,018	38,7	0,24
-0,5	1,14	1,056	17,5	0,95
-0,6	1,14	1,066	12,3	1,20
-0,9	1,14	1,103	1,0	2,40

Однако с увеличением коэффициента корреляции вероятность потери склоном устойчивости не остается постоянной. Она закономерно уменьшается (см. рис. 2) с 44 % до 1% (см. табл. 2, столбец 4), т.е. опасность развития оползневого процесса при учете корреляции между прочностными параметрами уменьшилась более чем в 44 раза.

Не менее важным показателем при оценке оползневой опасности является индекс надежности  $\beta$ , который является мерой нормализации коэффициента устойчивости склона на стандартное отклонение  $K_{уст}$ :

$$\beta = \frac{K-1,0}{\sigma_K}, \quad (2)$$

где  $\sigma_K$  – среднеквадратическое отклонение коэффициента устойчивости склона  $K_{уст}$ .

Данный показатель позволяет подойти к оценке устойчивости склонов с позиций теории надежности.

Количественная оценка надежности на основе стохастического подхода является объективной мерой принимаемых технических решений. На рис. 4, приведена полученная по результатам расчетов зависимость индекса надежности от коэффициента корреляции между сцеплением и углом внутреннего трения грунтов. Согласно рекомендациям департамента военных инженеров армии США (рис. 5) [13], в зависимости от величины корреляции между сцеплением и углом внутреннего трения грунтов, уровень надежности модельного склона будет меняться от аварийно-опасного (при отсутствии корреляции между прочностными свойствами,  $\beta < 1$ ) до ненадежно-опасного уровня (при  $0,6 < \beta < 2,3$ ).

### *Заключение*

Стохастический анализ все более активно внедряется в лучшую мировую практику проектирования. В сравнении с детерминированными методами он обладает гораздо большей объективностью и гибкостью, т.к. позволяет

учитывать, как случайные, так и закономерные факторы при выполнении моделирования. Необходимыми условиями для его применения являются качественно выполненные инженерно-геологические изыскания по нормам существенно превышающие объемы, прописанные в действующих нормативных технических документах.

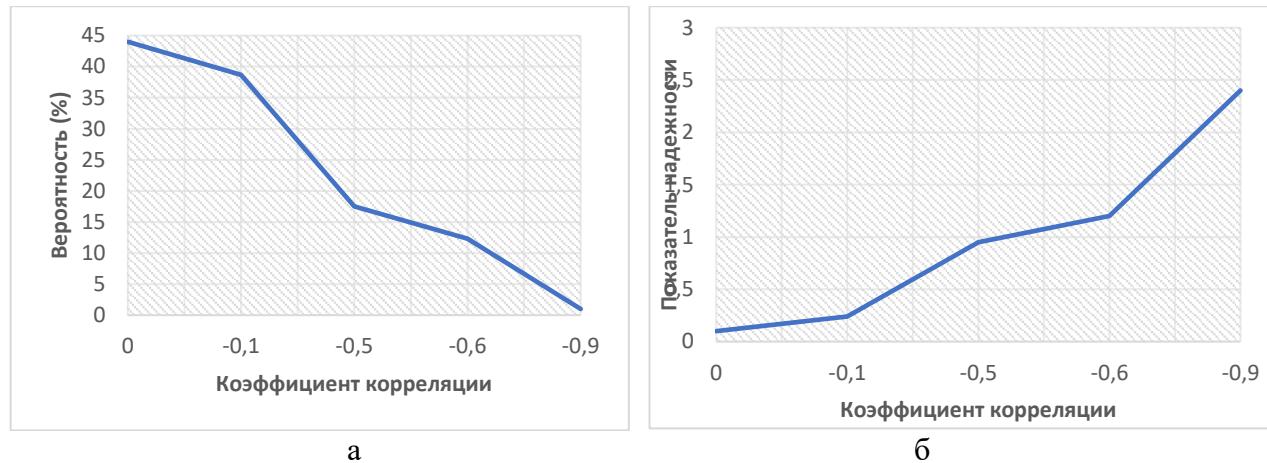


Рис. 4. Зависимость вероятности развития оползневого процесса от коэффициента корреляции между сцеплением и углом внутреннего трения грунтов (а); зависимость индекса надежности от коэффициента корреляции между сцеплением и углом внутреннего трения грунтов (б)

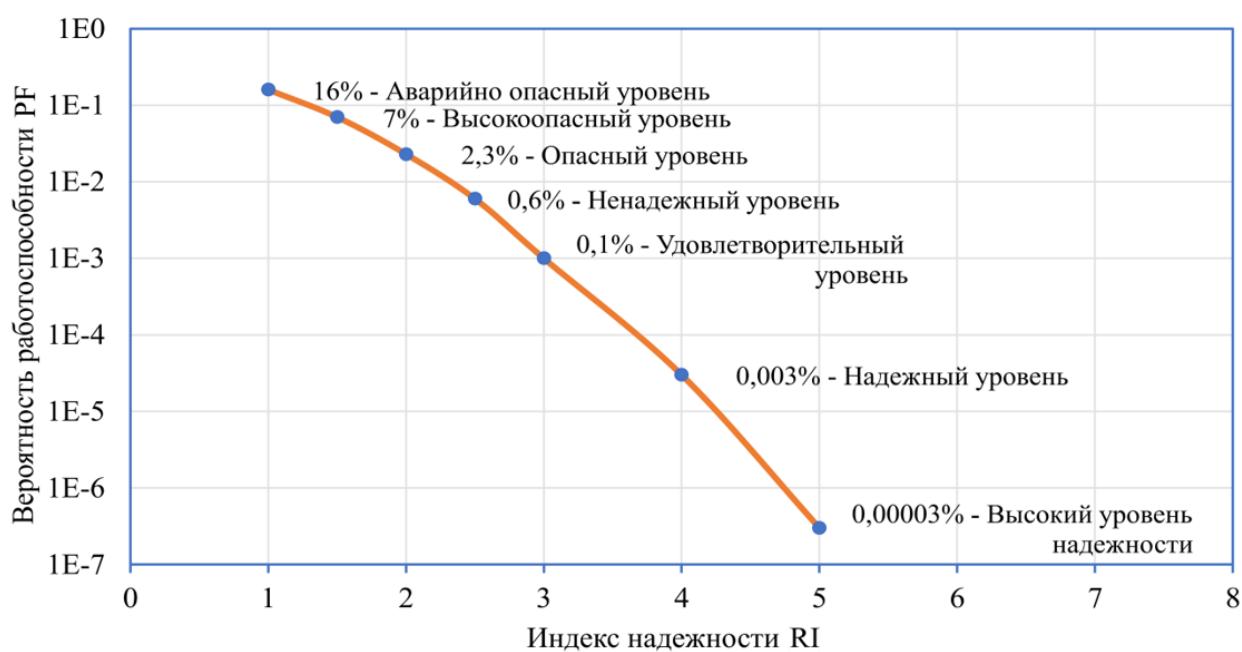


Рис. 5. Зависимость уровня вероятности от индекса надежности (по рекомендациям [13])

Приведенный пример расчета устойчивости склона показывает, что оценка его надежности может быть повышена путем учета хорошо известного в практике инженерно-геологических изысканий факта о взаимосвязи

прочностных характеристик грунтов. Но согласно отечественной практике принятия проектных решений, безопасность может быть обеспечена только за счет реализации дорогостоящих решений по инженерной защите.

### Список литературы

1. Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.
2. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Влияние различных факторов на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов // Инженерная геология. 2016. № 1. С. 16–21.
3. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оценка геологического риска с использованием вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склона // Материалы X Международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков (ГЕОРИСК-2018) «Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата». М.: Изд-во РУДН, 2018. Т. 1. С. 303–308.
4. Кан К., Зеркаль О.В. Применение вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склона // Инженерная геология. 2017. № 4. С. 18–26.
5. Кан К., Фоменко И.К., Ван Ц., Никольская О.В. Вероятностная оценка устойчивости откоса в скальных грунтах на основе обобщенного критерия прочности Хоеха-Брауна // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 5. С. 60–68.
6. Кургузов К.В., Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Вероятностно-статистические подходы при оценке неопределенности литотехнических систем // Геоэкология. 2020. № 2. С. 80–89.
7. Схематизация свойств грунтов при математическом моделировании в инженерной геологии и геотехнике / И.К. Фоменко, К.В. Кургузов, Д.Н. Горобцов, М.А. Новгородова, О.Н. Сироткина // Независимый электронный журнал «ГеоИнфо». 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geoinfo.ru/product/fomenko-igor-konstantinovich/skhematizaciya-svojstv-gruntov-pri-matematicheskem-modelirovaniyu-v-izhenernoj-geologii-i-geotekhnike-44659.shtml> (дата обращения: 26.11.2023).
8. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике / Пер. с англ. А.В. Сулима-Самуйло, под ред. проф. М.Н. Гольдштейна. М.: Госстройиздат, 1958. 607 с.
9. Baecher G.B., Christian J.T. Reliability and statistics in geotechnical engineering. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2005. 616 p.
10. El-Ramly H., Morgenstern N., Cruden D. Probabilistic slope stability analysis for practice // Canadian Geotechnical Journal. 2002. Vol. 39. No. 3. P. 665–683. <https://doi.org/10.1139/t02-034>.

11. Fenton G.A., Vanmarcke E.H. Simulation of random fields via local average subdivision // Journal of Engineering Mechanics. 1990. Vol. 116. No. 8. P. 1733–1749.
12. Fomenko I., Shubina D., Kurguzov K., Gorobtsov D. The uncertainty of geological systems in geotechnical calculations // Proceedings of the 6th GeoChina International Conference on Civil “Developments in Sustainable Geomaterials and Environmental Geotechnics”. Nanchang, China: Springer, Cham, 2021. P. 104–112. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-79647-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-79647-1_8).
13. Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering. Washington, DC, USA: United States Army Corps of Engineers, 1997. 15 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://archive.org/details/DTIC ADA403281>/mode/2up (дата обращения: 26.11.2023).
14. Javankhoshdel S., Cami B., Bathurst R., Corkum B. Probabilistic analysis of layered slopes with linearly increasing cohesive strength and 2D spatial variability of soil strength parameters using non-circular RLEM approach // Proceedings of the International foundation Congress and equipment Expo 2018 “Advances in Geomaterial Modeling and Site Characterization”. Orlando, FL, USA, 2018. P. 113–142. <https://doi.org/10.1061/9780784481585.014>.
15. Morgenstern N.R., Price V.E. A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces // The Computer Journal. 1967. Vol. 4. P. 388–393.
16. Vanmarcke E. Random fields: analysis and synthesis. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1983. 382 p.

**I.R. Suslin<sup>1</sup>, I.K. Fomenko<sup>1</sup>, L.A. Musaeva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, suslinir@mgri.ru, ifolga@gmail.com

<sup>2</sup>Mosoblydroproject JSC, Dedovsk, musaevala@hydroproject.com

## **STOCHASTIC ANALYSIS IN ASSESSING SLOPE STABILITY**

**Abstract.** The lack of information about lithotechnical systems, the laws of ongoing processes, often raises issues during the construction of an object. Since uncertainty is closely linked to the concept of a random variable and its probabilistic nature, stochastic calculations must be used for more reliable solutions to engineering and geological problems. The article's goal is to demonstrate the effectiveness of the stochastic analysis in assessing the slope stability.

**Key words:** uncertainty; slope stability; stochastic analysis; random limit equilibrium method (RLEM); correlation.

**Царев М.А.**

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, domikes@gmail.com

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННЫХ ГРУНТОВ**

**Аннотация.** Грунты, модифицированные для сооружения фильтрационных и сорбирующих завес, повышения прочностных характеристик геологического массива, обладают различным фильтрационным сопротивлением, это относится и к конструкциям из строительных материалов, таких как бетон. Состав искусственно созданного материала со временем может измениться в условиях геологического массива, поэтому должна быть подтверждена устойчивость его защитных свойств. Моделирование динамики подземных вод с модифицированными грунтами и строительными материалами нередко опирается на справочные фильтрационные параметры и на виртуальные значения проницаемости, что не позволяет обоснованно учесть изменение во времени расхода фильтрации через инженерный барьер при длительном подтоплении зданий и сооружений, противофильтрационных завес на хранилищах отходов. Оценка коэффициентов фильтрации  $K_f$  и проницаемости  $K_p$  в образцах слабопроницаемых искусственно модифицированных грунтов позволяет выбрать противофильтрационный материал и технологию его применения с учетом влияния природных и техногенных процессов на фильтрационные свойства. В работе представлены основные результаты изучения изменения проницаемости в процессе фильтрации через образцы, а также методические предложения к оценкам эволюции материала и деградации его защитных свойств в массиве.

**Ключевые слова:** коэффициент фильтрации бетона; коэффициент фильтрации глин; противофильтрационный экран; противофильтрационная завеса; защита подземных вод; эволюция материалов; барьерные материалы; деградация фильтрационных свойств; подтопление фундамента.

### *Введение*

Состав и способ создания материала с необходимыми противофильтрационными свойствами выполняется при проектировании инженерного барьера безопасности, при этом гидрогеологическое моделирование динамики подземных вод со слабопроницаемыми грунтами и материалами должно опираться на изученные значения проницаемости, с учетом возможного изменения структуры и состава материала в процессе фильтрации и как следствие его фильтрационных и сорбционных свойств. Необходимо учитывать, что справочные фильтрационные параметры (например, для бетонов стандартных марок), дают ориентировочные значения в пределах нескольких порядков м/сут [2] эти значения требуют уточнения для решения гидрогеологических задач. Для строительства противофильтрационных и сорбирующих завес [10, 12] и инженерных барьеров безопасности приповерхностного захоронения радиоактивных отходов [1] используются материалы нестандартного состава, при этом температура массива, состав фильтрующейся жидкости, напряженно-деформированное состояние и способ

создания барьера влияют на его проводимость [7, 8, 14]. Таким образом, требуется лабораторное изучение образцов модифицированного грунта или строительного материала при долговременной фильтрации, что важно для оценки безопасности от длительного подтопления противофильтрационных конструкций на хранилищах отходов, и подтопленных зданий для их сохранения, в этих случаях небольшие расходы фильтрации за длительное время дают значительные объемы воды, изменение проводимости материала при этом может дополнительно сказаться на гидрогеологических расчетах утечки через инженерный барьер безопасности и на его прочности.

Цель работы – отработка методического подхода к оценке изменения коэффициентов проводимости  $K_p$  и фильтрации  $K_\phi$  образцов, с учетом возможного выщелачивания компонентов барьера материала, расчетное описание потери твердой массы образца, анализ возможности фильтрационной деградации растворения материала на основе лабораторного испытания и расчет времени ее наступления. В задачи работы вошло совершенствование автоматизированного комплекса [9] для фильтрационных и миграционных испытаний в образцах слабопроницаемых материалов; оценка фильтрационных свойств закрепленных песков, а также Mg-Na-бентонитовой глине и глиноземистом цементном камне. В результатах представлен методически ориентированный подход к оценке фильтрационной устойчивости материала, выводы и предложения к проведению опытов.

### *Подход к оценке противофильтрационных свойств слабопроницаемых грунтов и материалов инженерных барьеров безопасности*

При подтоплении сооружений и в том числе пунктов приповерхностного захоронения отходов принципиально возможна фильтрация из сооружения в водоносный горизонт или насыщение внутренней части сооружения водой (рис. 1).

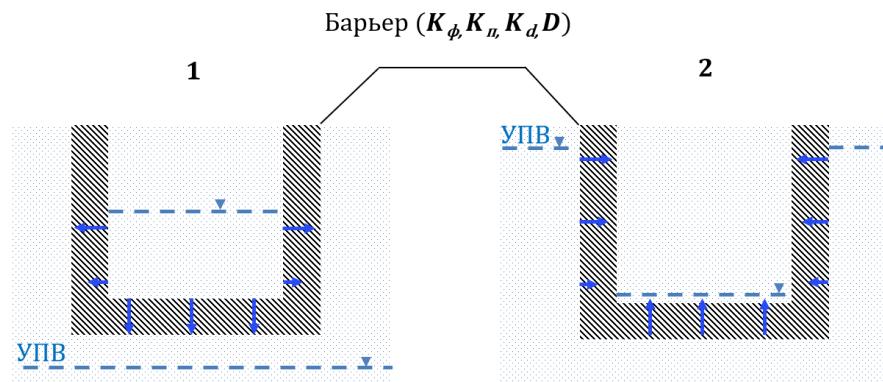


Рис. 1. Фильтрационная схема подтопления инженерных барьеров безопасности.  
Обозначения: 1 – при условии фильтрации из сооружения в водоносный горизонт; 2 – при условии насыщения внутренней части сооружения водой. Схема автора

Миграция загрязнения в подземные воды из хранилища отходов с потоком фильтрующейся воды возможна при возникновении гидравлической связи в инженерном барьере и в подземных водах. По мнению автора, ухудшение изолирующих свойств материала будет зависеть от изменения его пористости, это возможно за длительное время, если изменится состав и структура, что зависит от начального состава и структуры образца, а также напряженно-деформированного состояния, температурных условий и от поступления воды, ее температуры и состава.

Пункты захоронения радиоактивных отходов, в своей особенности, предполагают многобарьерную систему (рис. 2). Каждый барьер сооружается различным способом: природных глины уплотняют в котловане, затем выполняется заливка бетона, а после загрузки отсеков контейнерами пустоты между ними засыпаются сорбирующим глинопорошком.

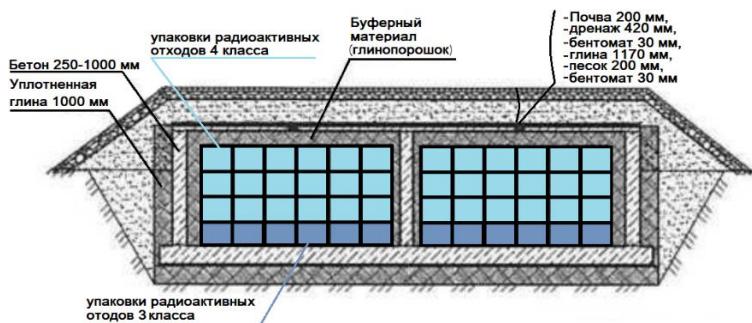


Рис. 2. Проектная конструкция отсеков пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов [1]

Изучение эволюции слабопроницаемых материалов в геологическом массиве требует проработки. Барьеры сооружаются из комбинаций материалов, которые необходимо подбирать так, чтобы их сорбирующие и противофильтрационные свойства сохранялись, поэтому должно исключаться физико-химическое преобразование в конкретных условиях: с учетом давлений, химического состава, температур и скоростей фильтрации. Фильтрационное сопротивление и сорбирующая способность не должны снижаться, в этом, на взгляд автора, состоит работа инженерного барьера, обеспечивающая долговременную безопасность. Если барьер используется и как конструкция, не должна снижаться ее прочность и устойчивость при фильтрации. Оценка конкретных сроков службы материала зависит от неопределенностей, в числе которых нелинейные или единовременные изменения, например, под воздействием опасных геологических процессов, таких как сейсмотектонические, склоновые или геокриологические. Например, изменение проницаемости уплотненных глин для локализации радиоактивных отходов изучалось до и после циклического промерзания-оттаивания, а результат зависел от консистенции глинистого материала и содержания воды (рис. 3).



Источник: лабораторное испытание, Царев М.А.

Рис. 3. Результаты изучения изменения  $K_{\phi}$  материалов глинистых барьеров безопасности при промерзании: а – уплотненная природная ожелезненная глина; б – суспензия на основе ожелезненной глины и бентонита

Для просыпки пустот между контейнерами с отходами используются сыпучие глинистые крупки и порошки, которые самоуплотняются под собственным весом, для моделирования таких условий перед фильтрационным опытом на бентонитовую крупку задана нагрузка, соответствующая глубине засыпки (рис. 4).



Рис. 4. Оценка  $K_{\phi}$  буферной засыпки (бентонитовая крупка) при уплотнении под давлением 60 кПа. Вид: а – после уплотнения; б – после фильтрации

Значение  $K_{\phi}$  на шестиметровой высоте засыпки различалось два порядка: от единиц до сотых м/сут.

Природные глины для создания сплошного экрана уплотняются по-разному в зависимости от влажности (рис. 5), поэтому для оценки оптимальной влажности максимального уплотнения в массиве используется методика уплотнения в стандартном приборе [3].

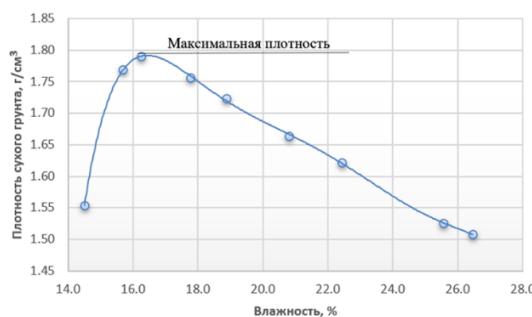


Рис. 5. График для изучения влажности максимального уплотнения глины. Испытание автора

Например, в опыте с ожелезненной природной глиной, представленной на рис. 3, значение влажности оптимального уплотнения составило 16,2% (см. рис. 5).

#### *Автоматизированный комплекс для фильтрационных и миграционных испытаний в образцах слабопроницаемых материалов*

Разработанный фильтрационный комплекс (рис. 6) из принципов общих с известными установками [2] имеет подачу воды пневматическим способом. Остальные элементы отличаются от известных тем, что: установка дополнена цифровыми датчиками значений температуры и давления, которые используются для расчета проницаемости и автоматически считываются при регистрации расхода расходомером. Разработанный расходомер позволяет одновременно производить опыт на большом количестве образцов, для которых при этом можно задавать разный состав и температуру жидкости. Элементы фильтрационного комплекса выполнены из химически нейтральных полимерных материалов для предотвращения возможной химической реакции с изменением состава жидкости и коррозии на контакте с образцом.

Снятие замеров контролируется расходомером [11], имеющим простую конструкцию (рис. 7), во вход которой под цифрой 1 приходит фильтрат из испытуемого образца и удаляется через трубку 3, замыкая поочередно инертные электроды 4 и 5, соединенные с контроллером 6, который регистрирует время прохождения жидкости в трубке известного объема.

При замыкании верхней пары производится запись расхода фильтрации и считывание информации со всех датчиков установки, вместе с этим включается продувка измерительной трубы небольшим компрессором 8 через клапан 9. Диаметр трубы и расстояние между электродами можно менять. Таким образом, диапазон измерения кондуктометрическим расходомером широкий (рис. 8).

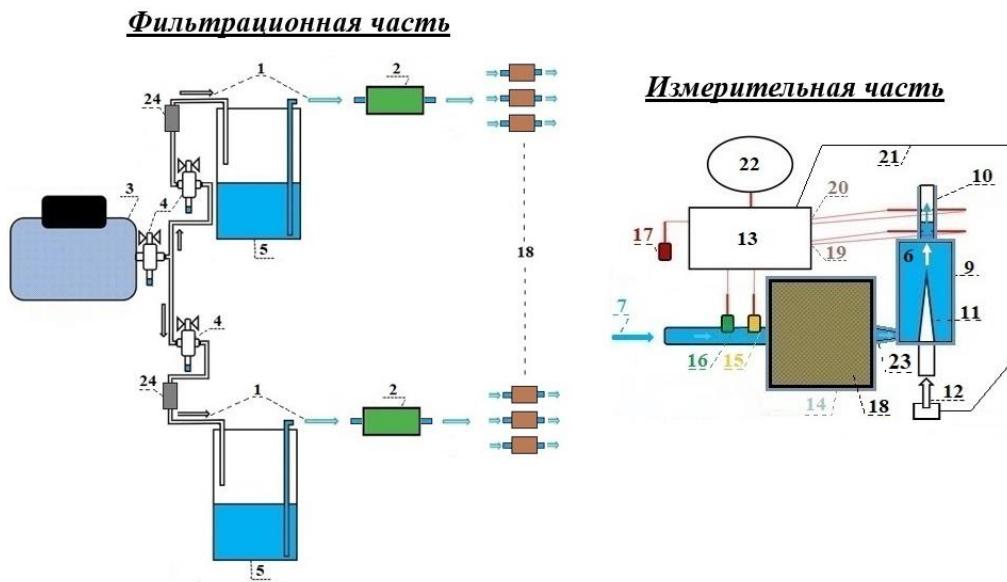


Рис. 6. Автоматизированный комплекс для фильтрационных и миграционных испытаний в образцах слабопроницаемых материалов. *Обозначения:* 1 – подача воздуха и воды постоянного давления в комплексе; 2 – температурный регулятор; 3 – компрессор; 4 – регулятор давления воздуха со сборником конденсата; 5 – колба с водой (раствором) заданного давления и температуры; 6 – расходомер сверхмалых потоков; 7 – источник подачи воды (водопровод, емкость под давлением); 8 – регулятор давления воды; 9 – приемная камера расходомера; 10 – измерительная трубка; 11 – продувочный клапан; 12 – компрессор; 13 – плата с контроллером; 14 – термоизоляция; 15 – датчик температуры раствора; 16 – датчик давления раствора; 17 – датчик атмосферного давления и температуры; 18 – герметичная емкость с испытуемым образцом; 19 – вход первой пары электродов через потенциометрический датчик; 20 – вход второй пары электродов через потенциометрический датчик; 21 – управляемое питание малогабаритного компрессора; 22 – персональный компьютер или дисплей с модулем памяти; 23 – вход для подвода фильтрата; 24 – обратный клапан. Схема автора

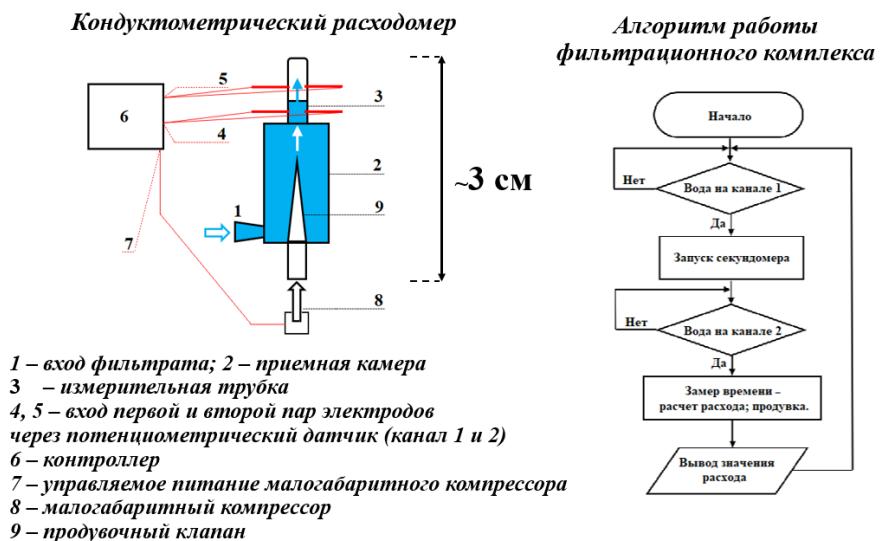


Рис. 7. Схема работы фильтрационного комплекса с кондуктометрическим расходомером. Схема автора

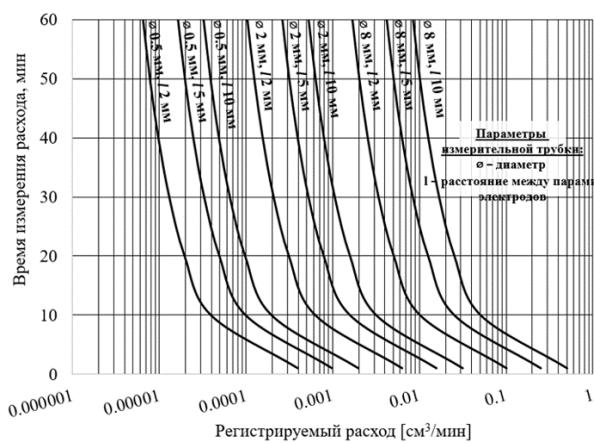


Рис. 8. Численные соотношения параметров кондуктометрического расходомера. Схема автора

В авторском случае использована трубка диаметром 2 мм с расстоянием пар около сантиметра. Регистрируемый трубкой расход за час, составляет до десятитысячной кубического сантиметра в минуту и менее. Емкости для фильтрационных испытаний выполнены из полимерных материалов (полипропилен, фторопласт, оргстекло) (рис. 9). Образец связного грунта может герметизироваться мастикой по стенкам как указано на средней схеме, или по принципу работы камеры трехосного сжатия с герметизацией пристеночного пространства образца давлением воды.

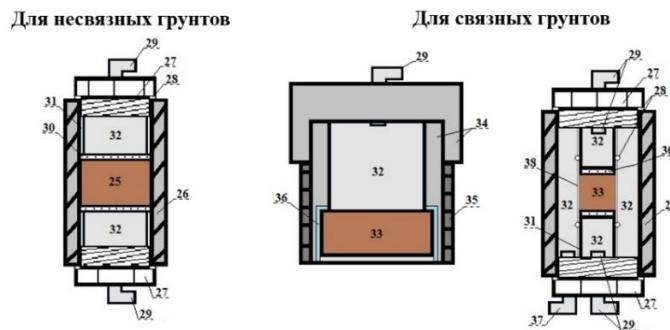


Рис. 9. Емкости для размещения образцов. Обозначения: 25 – сыпучий материал заданной плотности; 26 – прозрачный полимерный корпус емкости для образца (оргстекло, полипропилен и др.); 27 – резьбовая заглушка; 28 – уплотнительное кольцо; 29 – фитинг угловой с резьбой для фильтрационной трубы (например, полипропилен); 30 – твердый пористый фильтр (например, полипропилен); 31 – вставки, ограничивающие высоту образца (например, полипропилен); 32 – жидкость; 33 – образец твердого материала; 34 – корпус емкости образца (например, сварной полипропилен); 35 – стальная гильза; 36 – герметизирующая мастика (например, эпоксидный клей); 37 – фитинг угловой с резьбой для создания бокового обжатия (полипропилен и др.). Схема автора

Учет температуры воды, воздуха, давления раствора на входе в образец и атмосферное давление производится датчиками, представленными на рис. 6, их результаты могут быть интерпретированы в графическом виде (рис. 10).



Рис. 10. Результаты регистрации температуры и атмосферного давления для оценки проницаемости (по данным автора)

Поправка для сравнения значений  $K_{\phi}$  полученных по расходам, снятым при разной температуре, позволяет вычислить коэффициент фильтрации, приведенный к температуре 10°C ( $K_{10}$ ) согласно ГОСТ 25584-2016 [4].

#### *Длительный фильтрационный эксперимент на закрепленном песке*

Для точных исследований влияния минерализации и температуры используется характеристика фильтрационного сопротивления –  $K_{\phi}$  в Дарси ( $\text{Д}$ ), учитывающий динамическую вязкость  $\eta$  в сП, при этом кинематическая вязкость  $v$  в  $\text{мм}^2/\text{с}$  изучается на вискозиметре (рис. 11) при нужной исследователю температуре согласно ГОСТ 33768-2015 [5]. Например, для модифицированных (закрепленных) песков противофильтрационной завесы выполнялось испытание на пресной воде и рассоле, соответственно для исследования устойчивости материала к выносу частиц, выщелачиванию и для оценки проницаемости на рассолах объекта.



Рис. 11. Результаты оценки вязкости фильтрующихся жидкостей на вискозиметре ВПЖ – 4 0.37

Значения  $K_{\phi}$  в м/сут оценены при стабилизации расхода фильтрации водопроводной воды, представлены в табл. 1 и расположены в пределах одного порядка.

Таблица 1  
 Результаты фильтрационного опыта на закрепленном песке

Период стабильного расхода, сут	$I, \text{см}_{\text{вод.ст.}}/\text{см}$	$V, \text{см}/\text{с}$	$K_{\phi}, \text{м}/\text{сут}$
2–6	520	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$
18–20	230	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
20–22	336	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
26–31	49	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
38–54	9	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
66–70	7	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$

Длительный фильтрационный эксперимент продолжительностью 70 сут не привел к росту коэффициента фильтрации образца закрепленного песка, т.е. фильтрационное сопротивление не ухудшилось (рис. 12, см. табл. 1).

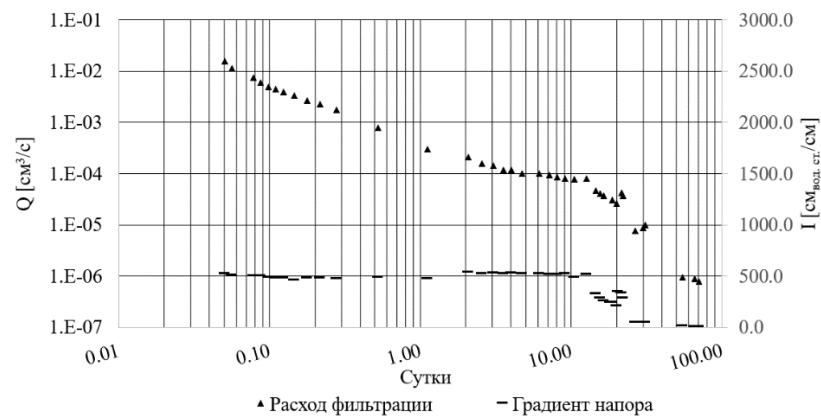


Рис. 12. Длительный фильтрационный эксперимент на закрепленном песке

Снижение градиента напора со стабилизацией скорости не выявило проявление начального градиента как на рассоле, так и на водопроводной воде (рис. 13).

При фильтрации рассола использовались пески, закрепленные другим способом (см. рис. 13, б), оценивалось значение  $K_{\phi}$  в  $\Delta$ , порядок этой размерности приближенно соответствует размерности  $K_{\phi}$  в  $\text{м}/\text{сут}$ , различие на четыре порядка  $K_{\phi}$  и  $K_{\phi}$  связано с различной технологией создания искусственного грунта.

В процессе фильтрации на выходе из образцов могут контролироваться показатели химического состава, в т.ч. pH и общая минерализация (кондуктометрическим способом). Пробный опыт позволяет сравнить состав воды на входе в образец и на выходе из него (рис. 14).

В представленных результатах пробы фильтрата имеют значения минерализации и pH, сопоставимые с водой на входе в образцы. Изменение минерализации и водородного показателя может быть связано с различными процессами, в данном случае вероятнее всего с некоторой сорбцией и десорбцией компонентов воды материалом.

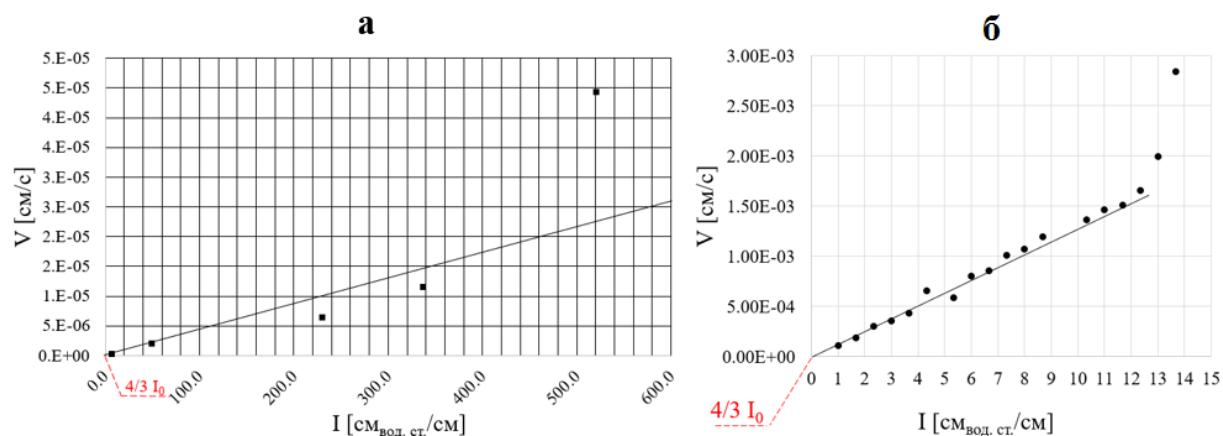


Рис. 13. Оценка проявления начального градиента  $I_0$ : а – воды ( $\eta = 1,09$  сП); б – раствора NaCl ( $\eta = 1,85$  сП)

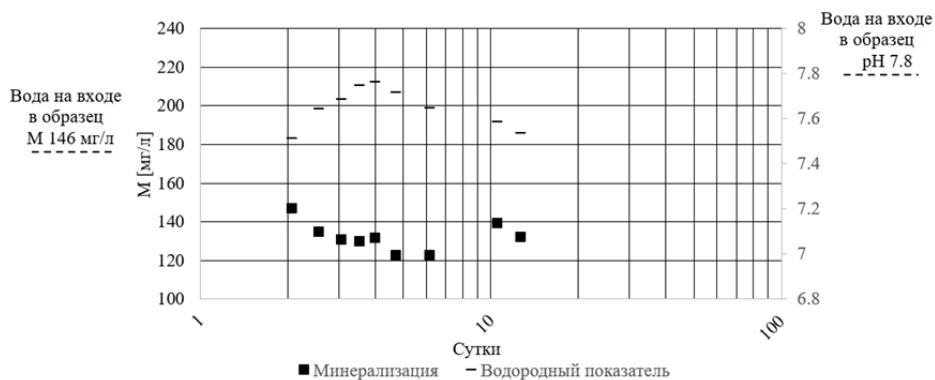


Рис. 14. Изменение pH и общей минерализации фильтрата на выходе из образца

### Длительный фильтрационный эксперимент на Mg-Na-бентонитовой глине Зыряновского месторождения

Минеральный состав исследованной бентонитовой глины (рис. 15, б) в % изучен путем рентгенофазового анализа на дифрактометре RIGAKU MULTIFLEX 600: смектит – 72, кварц – 16, гидрослюдя – 5, кальцит – 4, каолинит – 1, гипс – 1, плагиоклаз – 1. Значение  $K_f = 1,7 \cdot 10^{-7}$  м/сут получено при минимальной насыпной плотности бентонитового порошка  $\rho_{\min} = 1,14$  г/см<sup>3</sup>. Начальный градиент фильтрации  $I_0$  можно оценить способом прямой линии по графику с результатами стабилизации расхода при разных градиентах (рис. 15, а). Однако такой способ вызывает сомнения, т.к. линейный тренд дает значение  $I_0 = 38$ , но отклонение от прямой линии при приближении к началу координат может пойти в любую сторону, поэтому требуется подтверждение значения  $I_0$  полной остановкой фильтрации.

Коэффициент фильтрации не изменялся на всех ступенях градиента фильтрации и составил порядка  $10^{-7}$  м/сут.

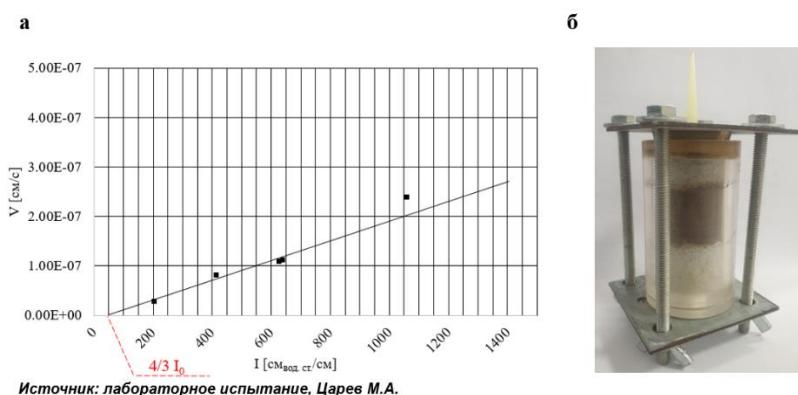


Рис. 15. Оценка начального градиента  $I_0$  на бентоните Зыряновского месторождения в стационарных условиях фильтрации: а – результаты опытов с различным градиентом напора; б – испытуемый образец

*Длительный фильтрационный эксперимент на глиноземистом цементном камне*

В эксперименте с увеличенной скоростью фильтрации через образец глиноземистого цементного камня обнаружено ухудшение противофильтрационных свойств со временем. В составе образца (рис. 16) около сорока процентов мелкозернистого песка, глинозем и оксид кальция, присутствует пять процентов Mg-Na-бентонитовой глины, в составе которой в свою очередь преобладает смектит и кремнезем.

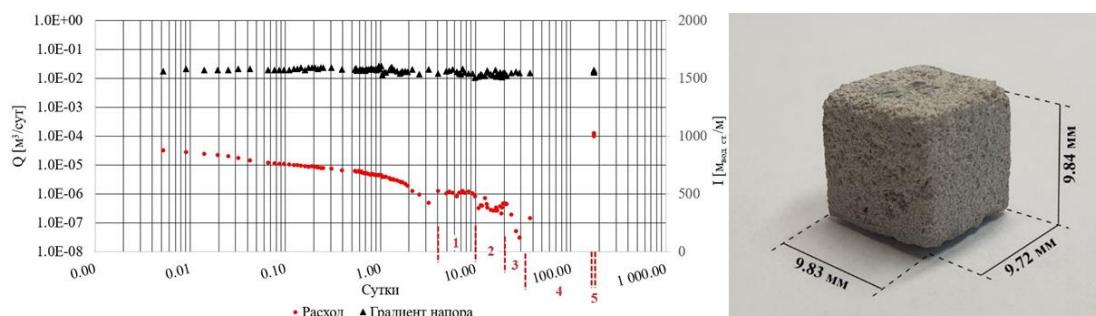


Рис. 16. Результаты фильтрационного опыта на образце глиноземистого цементного камня на разработанном фильтрационном комплексе с автоматической записью данных

Значение  $K_f$  оценено согласно основному закону фильтрации, первая стабилизация расхода дала значение порядка  $8 \cdot 10^{-6}$  м/сут при скорости 1 см/сут. На десятые сутки расход упал, предположительно в связи с набуханием или кольматацией в порах, затем последовала стабилизация при 2,5 раза меньшей скоростью и проницаемостью. После этого через месяц наступила полная остановка фильтрации, при этом возобновившаяся с 37-х сут. Скорость фильтрации выросла и стабилизировалась на значении 120 см/сут, т.е. коэффициент фильтрации и скорость возросли на два порядка. Результаты фильтрационного опыта представлены в табл. 2.

Таблица 2  
 Результаты фильтрационного опыта на глиноземистом цементном камне

Номер опыта	Время от начала фильтрации $t$ , сут	$V$ , м/сут	$K_\phi$ , м/сут	Режим фильтрации
1	4–10	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	стационарный
2	10–20	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	стационарный
3	20–37	$< 10^{-4}$	$< 10^{-7}$	остановка
4	37–176	$< 10^{-7} – 1,2$	$< 10^{-7} – 7,9 \cdot 10^{-4}$	рост скорости
5	176–177	1,2	$7,9 \cdot 10^{-4}$	стационарный

Для оценки градиента начальной фильтрации при нескольких ступенях давления регистрировалась скорость фильтрации (рис. 17). Расчетное значение начального градиента фильтрации  $I_0 = 108$  подтверждено полной остановкой расхода.

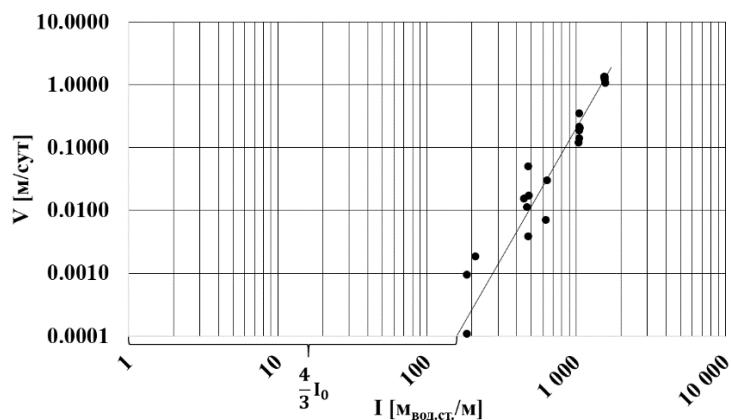


Рис. 17. Изменение скорости фильтрации через образец при разном градиенте напора для оценки начального градиента фильтрации  $I_0$  (по данным автора)

После фильтрационного опыта длительностью 6 мес. на торце образца со стороны выхода фильтрата отмечены отложения серого оттенка (рис. 18, *а*). Сухой остаток, образовавшийся при испарении порции самого фильтрата, отобранный на завершающем этапе, имел желтовато-белый цвет (рис. 18, *б*). Выдержанной мелкодисперсного порошка (из фильтрата, образца после фильтрации, исходного образца) в деионизированной воде, получены пробы жидкости, исследованные на масс-спектрометре, результаты представлены на диаграмме (рис. 18, *в*). В каждом образце раствора вытяжки содержание Fe, Cu, Ti, Mn оказалось незначительным (менее 0,25 мг/л), при этом выявлено преобладающее содержание кальция.

Поскольку основным процессом, уменьшающим фильтрационное сопротивление образца вследствие роста его пористости, является коррозия выщелачивания – принимается, что в основном происходит вынос кальция, преобладающего в растворе (см. рис. 18). Допускается, что процесс роста

пористости зависит от выноса кальция и выражается в растворении его гидроксида при выщелачивании цементного камня.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  образуется в процессе гидролиза цементного камня. Для математического описания процесса выноса кальция использована простейшая модель равновесного растворения [10], основанная на балансе концентраций твердой фазы и раствора в порах зоны полного растворения и за фронтом растворения при поршневом вытеснении раствора. Результат расчета по такой модели позволяет оценить скорость растворения по величине  $\Delta n$  (аналог эффективной пористости или коэффициента равновесия) по соотношению концентраций в твердом комплексе и в растворе. Автором произведен обратный расчет баланса концентраций кальция в твердой фазе и растворе для оценки содержания кальция в твердой фазе в момент прорыва. Согласно модели [6], для расчета скорости растворения необходимо рассчитать концентрацию ионов раствора в зоне, подвергшейся растворению из системы уравнений:

$$C_{\text{Ca}} \cdot (C_{\text{OH}})^2 = K_{\text{пр}} \text{ и } z_{\text{Ca}} \cdot C_{\text{Ca}} = z_{\text{OH}} \cdot C_{\text{OH}} + z_{\text{Cl}} \cdot C_{\text{Cl}}.$$

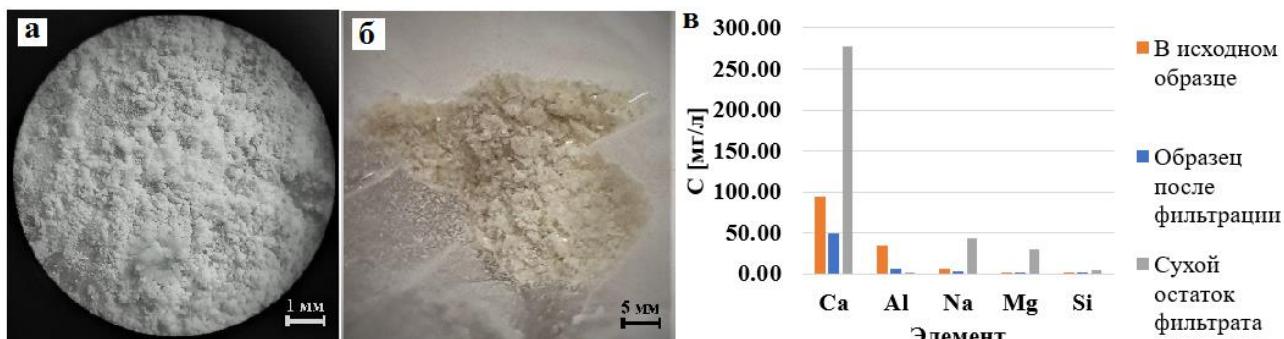


Рис. 18. Результаты исследования преобладающих катионов в образцах и фото кристаллических продуктов выщелачивания из образца: а – на торце образца; б, в – из сухого остатка из жидкости фильтрата [10, 12]

Первое уравнение представляет равновесную концентрацию растворения, а второе – условие электронейтральности раствора,  $K_{\text{пр}}$  – концентрационная константа равновесия  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $K_{\text{пр}} = \text{ПР}/\gamma_{\text{Ca}}(\gamma_{\text{OH}})^2 = 10^{-5}/(0,9 \cdot 0,98^2) \approx 1,16 \cdot 10^{-5}$ ,  $C_{\text{Cl}}$  – концентрация хлора в растворе ( $2,8 \cdot 10^{-5}$  моль/л),  $z_{\text{Ca}}$ ,  $z_{\text{OH}}$ ,  $z_{\text{Cl}}$  – заряды ионов, равные 2, 1, 1. Таким образом:  $C_{\text{Ca}} \cdot (C_{\text{OH}})^2 = 1,16 \cdot 10^{-5}$  и  $2 \cdot C_{\text{Ca}} - C_{\text{OH}} = 2,8 \cdot 10^{-5}$ ;  $C_{\text{Ca}} \approx 0,014$  моль/л,  $C_{\text{OH}} \approx 0,028$  моль/л.

В случае скачкообразного роста проницаемости образца из-за растворения на 37-е сут (см. рис. 16, табл. 2), средняя скорость растворения  $u$  составит  $0,98/53280 \approx 1,84 \cdot 10^{-5}$  см/мин, среднесуточная скорость фильтрации  $v$  в опыте при этом  $5,2 \cdot 10^{-4}$  см/мин. Скорость растворения  $u = v/(n + \Delta n)$  [13], где  $n$  – пористость,  $\Delta n$  – аналог коэффициента распределения. С учетом средней пористости образца  $n = 0,22$ ,  $\Delta n = (5,1 \cdot 10^{-4} / 1,84 \cdot 10^{-5}) - 0,22 \approx 27,5$ . Поскольку

$\Delta n = \Delta N/\Delta C$ , изменение содержания кальция в твердом комплексе  $\Delta N_{Ca} = 27,5 \cdot 0,014 \approx 0,385$  моль/л или 15,43 г/л, что с объемом образца 0,95 см<sup>3</sup> соответствует изменению массы Ca в 0,015 г. Исходя из состава смеси цементного камня и массы образца в 1,54 г, исходное содержание кальция до фильтрации в форме CaO составляет 0,12 г. Общая потеря массы образца составляет 0,19 г. Таким образом, скачкообразный рост  $K_f$  может быть связан с растворением 12% кальция в составе цемента.

Предлагается имитационный расчет выноса Ca из исследованного материала на основе бетона в качестве консервативного для сравнения устойчивости природных и искусственных слабопроницаемых материалов при различных скоростях фильтрации (рис. 19).

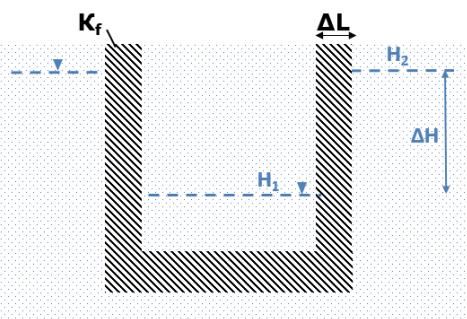


Рис. 19. Фильтрационная схема к имитационному расчету динамики выноса Ca из пористого материала при его толщине  $\Delta L$ , перепаде давления  $\Delta H$  и известных из эксперимента  $\Delta n$  и  $K_f$

Например, при известном из опыта вкладе растворения в изменение расхода и при изученном в ходе того же опыта коэффициенте фильтрации, при полуметровой толщине барьера и семиметровом перепаде напора на сторонах барьера процесс прорыва из-за растворения возможен через длительное время, прямой расчет дает более пятисот лет: при известных из опыта  $\Delta n$  и  $K_f$  имитационный расчет динамики выноса Ca из пористого материала, при его толщине  $\Delta l$  и перепаде давления  $\Delta H$  на сторонах:

$$u = K_f \cdot (\Delta H) / \Delta l (n + \Delta n) = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ м/сут} \cdot 7 \text{ м} / 0,5 \text{ м} \cdot (0,22 + 27,52) = 2,49 \cdot 10^{-6} \text{ м/сут}$$

или  $\approx 540$  лет.

### Выводы

1. Представленный подход предлагается для оценки фильтрационной устойчивости пористых строительных материалов от физико-химического изменения в их структуре в условиях массива при влиянии условий и воздействий на проницаемость, включает в себя: длительный фильтрационный опыт через образцы при постоянном давлении воды; оценку  $I_o$  и  $K_f$  образца материала, исследование химического состава вытяжки раствора в исходном образце и после выщелачивания фильтратом порового пространства образца в

ходе фильтрации; экспериментальную оценку времени до изменения фильтрационных свойств образца в результате растворения; расчетную оценку потери массы; методически ориентированную оценку фильтрационной устойчивости материала при заданной его толщине от растворения при фактической скорости фильтрации  $V$  с учетом проявления  $I_o$ .

2. Деградация противофильтрационных свойств испытанного образца бетона проявляется скачкообразно из-за выноса Са, что следует из графика временного прослеживания расхода фильтрации, т.е. для различных материалов необходимо индивидуальное изучение кинетики деградации противофильтрационных свойств.

3. В большинстве природных условий приповерхностного захоронения на начальных этапах фильтрация через поровое пространство исследованного материала будет минимальной из-за низкой проницаемости или отсутствовать при кольматации пор, таким образом при создании барьера из исследованного цементного камня необходим учет времени водонасыщения за счет капиллярного увлажнения и учет малых скоростей выноса.

4. Длительное фильтрационное испытание с изучением изменения состава образца и фильтрата предлагается для консервативной оценки фильтрационной устойчивости пористых строительных материалов заданной толщины от растворения (и других преобразований состава), с учетом градиента начальной фильтрации.

5. *Начальный градиент  $I_o$*  на слабопроницаемых закрепленных грунтах не обнаружен. Бентонит в рыхлом состоянии по линейному расчету дает  $I_o = 40$ , при этом у бетона с на три порядка большей проницаемостью зафиксировано значение начального градиента  $I_o = 108$ , таким образом расчет начального градиента способом «прямой линии» – не дает подтверждение физического процесса сдерживания воды межмолекулярным взаимодействием воды и породы. Проявление сдерживающих фильтрацию сил возможно существует, но на испытанных образцах автора такой эффект не установлен. На бентоните, и на слабопроницаемых грунтах начальный градиент требует прямого подтверждения остановкой фильтрации. Отклонение от линейного закона фильтрации может быть связано и с более простыми причинами, чем межмолекулярное взаимодействие воды и порового пространства, например, с кольматацией и деформацией пор. Высокий начальный градиент на испытанном бетоне вероятнее всего и связан с кольматацией порового пространства твердыми частицами слаборастворимых минералов вследствие растворения связующих минералов. Практическая польза оценки значения  $I_o$  по мнению автора следует из оценки возможности фильтрации в имеющихся гидрогеологических условиях и расхода фильтрации.

6. *Некоторые методические замечания.* Заключение о наличии  $I_o$  должно подтверждаться экспериментально с высокой точностью измерения расхода фильтрации при достигнутой его стабилизации для анализа зависимости  $V(I)$ , что возможно только с помощью высокоточных лабораторных весов и расходомеров,

это существенно облегчается автоматической записью расхода. Для оценки проявления  $I_0$  рекомендуется учитывать, что зависимость  $V(I)$  может иметь разный характер нелинейности в т.ч. обусловленный деформацией порового пространства или его кольматацией. Оценить проявление начального градиента можно только при снятии крайних замеров градиента и скорости фильтрации, для этого по двум крайним точкам можно записывать уравнение прямой и сравнить производные. Последняя точка снятия расхода при уменьшающемся давлении говорит о возможности фильтрации при данном напоре. Для прямых расчетов по примененной модели растворения необходима точная оценка концентрации хлора, ионной силы входного раствора, и достижение равновесия при определении концентрации растворяемого вещества. Проведение длительных фильтрационных испытаний целесообразно в условиях фильтрации, максимально приближенных к фактическим (с учетом температуры, вязкости, химического состава и давления жидкости), с исследованием проявления метасоматических процессов изменения минеральных веществ, таких как растворение и замещение, в материалах с нестандартным составом.

### Список литературы

1. Анисимов Н.А., Куваев А.А. Численное моделирование влагопереноса в конструкциях приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 3. С. 97–106. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2022-3-97-106>.
2. ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.
3. ГОСТ 22733-2016 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности.
4. ГОСТ 25584-2016 Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации.
5. ГОСТ 33768-2015. Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей.
6. Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод. СПб.: Наука, 2020. 144 с.
7. Савичев О.Г., Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. 160 с.
8. Толыпина Н.М. Физико-химические основы повышения коррозионной стойкости цементных систем путем оптимизации вещественного состава: дис. ... докт. техн. наук. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Щухова, 2016. 50 с.
9. Царев М.А. Результаты использования экспериментального фильтрационного комплекса с автоматизированной системой сбора информации для оценки коэффициента фильтрации слабопроницаемых материалов // Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций «Перспективы

- развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: ООО «Геомаркетинг», 2022. С. 442–453.
10. Царев М.А. Расходомер сверхмальных потоков. Патент РФ № 2803394 от 12.09.2023.
  11. Царев М.А., Лободенко И.Ю. Экспериментальная оценка противофильтрационных свойств пористых материалов для долговременной защиты зданий и сооружений // Сборник тезисов докладов XV Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием). Сочи, 2023. С. 172–178.
  12. Царев М.А., Лободенко И.Ю., Понизов А.В., Родин А.В. Экспериментальная оценка изменения фильтрационных свойств геохимического барьерного материала на основе бетона при растворении // Труды V Всероссийской научной конференции с международным участием им. проф. С.Л. Шварцева «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Томск, 2023. С. 95–100.
  13. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: КДУ, 2009. С. 37–41.
  14. Элбакидзе М.Г. Фильтрация воды через бетон и бетонные гидротехнические сооружения. М.: Энергоатомиздат, 1988. 104 с.

**M.A. Tsarev**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, domikes@gmail.com

## **EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF FILTRATION PARAMETERS STABILITY FOR ARTIFICIAL SOILS**

**Abstract.** Soils, modified for construct of filtration and sorbing curtains, strength soil improvements, have different filtration resistance, this also applies to structures made of building materials such as concrete. The composition of the artificially created material may change over time by the conditions of a the soil massif, therefore, the stability of its protective properties must be confirmed. Modelling the dynamics of groundwater with modified soils and building materials is not infrequently based on reference filtration parameters or on virtual permeability values, which does not allow us to reasonably take into account the time change in filtration flow through the engineering barrier during prolonged flooding of buildings and structures, anti-filtration curtains at waste storages. The evaluation of filtration coefficient and permeability coefficient in samples of weakly permeable artificially modified soils allows you to choose an anti-filtration material and the technology of its application, taking into account the influence of natural and man-made processes on filtration properties. The paper presents the main results of research changes in filtration resistance during filtration through samples, as well as methodological proposals for assessing the evolution of the material and the degradation of its protective properties in the array.

**Key words:** concrete filtration coefficient; clay filtration coefficient; anti-filtration screen; anti-filtration curtain; groundwater protection; material evolution; barrier materials; degradation of filtration properties; foundation flooding.

## СЕКЦИЯ «АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ»

Гусаков М.Г., Мешканцев Р.А.

ООО «Археологические изыскания в строительстве», г. Москва, arheolog-rus@yandex.ru

### УНИКАЛЬНЫЕ АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ НАХОДКИ НА ТЕРРИТОРИИ г. МОСКВЫ

**Аннотация.** Вот уже много лет археологи, занимающиеся эпохой железного века Восточной Европы, пытаются определить назначение и рабочую принадлежность так называемых «грузиков дьякова типа». За более 150-летний период со временем первой находки, были высказаны различные версии предназначения этого предмета. В своей публикации авторы попытались проанализировать высказанные ранее главные версии принадлежности «грузиков», и в свою очередь предложили свой вариант решения. Для этого были проделан ряд опытов с «грузиками» и «сковородками» и появилась предположение, что обсуждаемая версия вполне имеет право на существование. По авторскому мнению, «грузик» в комбинации со «сковородкой», является масляным жировым светильником.

**Ключевые слова:** «грузики дьякова типа»; «сковородки»; эпоха железного века; жилище; светильники; костровой обжиг.

Всем хорошо известно, что археология – историческая наука, изучающая прошлое человека по вещественным источникам. Любая хозяйственная деятельность во все времена оставляет вещественные доказательства. Вещи, созданные руками человека, имеют хронологический отпечаток, т.е. они своеобразные свидетели времени. Но, к сожалению, масса находок в виде предметов, извлекаемых из «культурного слоя», как правило, доходят во фрагментах, т.е. поломаны, испорчены или почти неузнаваемы и специалистам приходится их рапознавать и восстанавливать по чертежам или описаниям. Есть находки, о назначении которых ничего нельзя сказать определенного, т.к. неизвестно, для чего их сделали. Среди таких уникальных предметов – «дьяковские грузики».

«Грузики дьякова типа» занимают второе место после фрагментов керамики по количеству находок из городищ и поселений железного века лесной полосы Восточной Европы. В течение долгого времени наряду с сетчатой керамикой, глиняные «грузики» считались типичной находкой дьяковской культуры. Пожалуй, нет городища или селища эпохи железного века, где не находили бы «грузики». Они стали известны благодаря раскопкам на территории Дьякова городища в г. Москве. Первым исследователем Дьякова городища в 1821 г. был З.Я. Доленга-Ходаковский. Самостоятельные раскопки начались в 1872 г. Д.Я. Самоквасовым и затем были продолжены Г.Д. Филимоновым в 1875 г., а в 1889 г. – В.И. Сизовым. В XX в. городище раскапывалось под руководством в 1921 г. Ю.В. Готье,

в 1935 г. – К.Я. Виноградова, в 1981–1987 гг. – Н.А. Кренке. В 2001–2004 гг. раскопки были продолжены под руководством А.Г. Векслера.

Впоследствии А.А. Спицын составил карту распространения «грузиков» не только из дьяковской культуры, но из всех известных ему в то время памятников, и получилось, что «грузики» были не только в дьяковской культуре, а на огромной территории. П.Н. Третьяков предложил называть их «грузиками» «балтского типа», но археологам оказалось привычным первое название [8].

Дискуссия о происхождении и назначении «грузиков» ведется уже более 150 лет. По-видимому, она закончится только тогда, когда сумма аргументов будет настолько очевидной для всех, что продолжение темы потеряет смысл.

Одному из авторов этой статьи не раз приходилось обращаться к теме истории и назначении «грузиков дьякова типа» в печати, и в выступлениях на археологических конференциях [2, 3], тема эта большая и весьма непростая в своем решении.

В начале 1970-х гг. развернутую сводку и систематику «грузиков дьякова типа» дал К.А. Смирнов [7]. Правда, автор ограничился только «грузиками» дьяковской культуры. Тем не менее, в его сводке были так же зафиксированы памятники за пределами дьяковской культуры. К.А. Смирнов [7] приводит примеры 1427 «грузиков» из 89 памятников эпохи раннего железного века, представляющих пять археологических культур: штрихованной керамики, днепро-двинской керамики, верхнеокской керамики, милоградской керамики, дьяковской керамики. Больше всего «грузиков» описано из дьяковской культуры. По данным О.Н. Мельниковой, исследователя памятников милоградской культуры, – синхронной раннему периоду «грузиков дьякова типа» и распространенной на территории северной Украины и Белоруссии, – «грузики», только извлеченные из городища Горошков, исчисляются цифрой 600 ед. Однако значительная часть «грузиков» милоградской керамики имеют свои специфические особенности, достаточно четко отличающие их из общей массы «грузиков» раннего железного века. Речь прежде всего идет о форме «грузиков», подражающих глиняным сосудам. Больше всего «грузиков» по последним данным (может быть и не совсем точным) представлено в дьяковской керамике – 1362 ед. В днепро-двинской культуре их насчитывается 158 ед., такое же число грузиков было опубликовано О.Н. Мельниковой по материалам милоградской культуры. Всего численность «грузиков», по расчетам М.Г. Гусакова [2, 3] на 2007 г., колеблется в пределах от 1581 (точно зафиксированных) до 2000 ед.

Обращает внимание тот факт, что при обилии вариантов «грузиков», есть общие их типы, присущие для всех культур. В первую очередь, это «грузики» так называемой грибовидной формы. Они представлены во всех культурах и легко узнаваемы. Также много «грузиков» конической формы или в виде усеченного конуса (рис. 1). Часто встречаются «грузики» типа катушки, биконические или такие, у которых форма как бы сделана из двух грибовидных форм, соединенных большими основаниями. Таким образом, можно

констатировать, что, несмотря на значительные территориальные расстояния и некоторые различия в материальной культуре, все они имеют общие типы форм. Из этого вывода следует утверждение, что «грузики» являются общим признаком для всех «лесных» культур.



Рис. 1. Формы «грузиков» конической формы или в виде усеченного конуса. Из фототеки авторов

Далее представлено краткое перечисление возможного использования «грузиков» различных исследователей.

Давно устоялось мнение, что «грузики» представляют ритуальные предметы, связанные с обрядовой деятельностью древних обитателей лесной полосы в эпоху железного века. Главным доводом в пользу версии об их культовом назначении послужило наличие орнаментов с изображением солярных знаков и лапидарные изображения животных [3, 7]. К этому следует добавить, что «грузики» могут являться частью или элементом обрядово-религиозной практики наряду с глиняными зооморфными и антропоморфными фигурками, миниатюрными сосудиками, глиняными плитками с точками на

плоскостях и «сковородками», которых встречалось достаточно много. Все находки «сковородок» были во фрагментированном состоянии и редко попадали в издания и тем более в экспозиции музеев. Весь этот набор предметов обычно относился археологами к предметам языческого культа (культов). Необходимо так же отметить, что этот «ритуальный реквизит» присутствует (может быть, не всегда в полном наборе) в раскопках многих городищ «лесных» культур эпохи раннего железного века.

Версия, что грузики имеют отношение к ткачеству [6], основана на наличии «потертостей от нитей» в сквозном канале и по основанию грузика. По мнению авторов, нанести такие «потертости» с помощью нити, учитывая твердость поверхности керамического грузика, не представляется возможным.

Авторы давно обратили внимание, что важным элементом для нового подхода к объяснению принадлежности «грузиков» является наличие сквозного канала диаметром 5–7 мм. Однако, есть и более прозаичные объяснения, если в качестве аргумента использовать канал для пропуска шнуря.

Надо признать, что авторы не первые в своем предположении, что грузик может являться составной частью светильника и его уже называли «крышкой светильника». Но вместе с «грузиками дьякового типа» предлагается обратить внимание на такой предмет, как «сковородка», упоминавшаяся ранее.

Нет сомнений, что основным источником света и тепла в жилище периода железного века являлся открытый очаг. Но был ли он единственным источником света, достаточным для ведения хозяйственной жизни в темное время суток, был ли необходим в теплое время года – маловероятно, соответственно дополнительное освещение было просто необходимо. Многочисленные археологические источники ответа на этот вопрос не дают.

Массовое присутствие «грузиков», исходя из площади городищ, заставляет задуматься о функционально-бытовом использовании данных изделий и возможном их пребывании в жилище далеко не в единственном экземпляре. Достаточно сказать, что только в Троицком городище было найдено 595 экземпляров.

К сожалению, из-за фрагментарности находок «сковородки» почти избежали пристального внимания археологов, о них удивительно скудная информация, конкретная статистика по ним нередко отсутствует. А.В. Успенская [9, С. 18–19] в отчете 1957 г. по городищу Подмоклово Серпуховского района Московской области описала «многочисленные глиняные сковородки», «...стенки их не высокие, орнаментированы насечкой. Иногда днище с верхней стороны украшено ямками» «найдены в верхних слоях». И.Г. Розенфельдт [5] приводит следующее сведения о «сковородках» в Щербинском городище: «Нам представляется, что в первой половине I тыс. н.э. глиняные сковородки еще не были распространены, и мнение об их раннем появлении могло возникнуть в результате суммарного анализа материалов из нестратифицированных комплексов многослойных памятников». И еще одно замечание приведено И.Г. Розенфельдтом в первой своей публикации о керамике дьяковской культуры,

в которой речь шла о Троицком городище, что в этом первом, раскопанном в послевоенное время городище, «сковородок» не найдено. Однако, на городищах бассейна Верхнего Поднепровья и Подесенья в период I–III вв. найдено очень много «сковородок» и они продолжают фиксироваться до V–VI вв.

Примеры хронологии «сковородок» в московской культуре IV–VII вв. приведены в книге А.М. Воронцова [1]. В публикациях о периоде середины II–второй половины III вв. о «сковородках» нет упоминания, но уже в периоды конец III–середина IV вв. они уже описаны. Аналогичная ситуация повторяется в период второй половины IV в. В период IV–V вв. глиняные «сковороды» представлены достаточно широко. Таким образом, можно уверенно утверждать, что хронология «грузиков» и «сковородок» частично совпадает. Необходимо заметить, что в даты или хронологию датировки находок постоянно вносятся правки.

У «грузика дьякового типа» есть сквозной канал, который можно снабдить фитилем, смоченным в масле. Авторы предлагают установить его в «сковороду», представив ее как предмет, который может служить емкостью для масла. Маслами могут быть жиры растительного либо животного происхождения, с необходимой текучестью для впитывания фитиля. Так получается, что в дьяковской культуре «сковородки» не всегда присутствуют, и авторы не настаивают на своем представлении, как на единственно возможным. «Сковорода» конечно же сформировалась не сразу у дьяковцев, ее путь до них был весьма долгим с берегов рек Припяти, Сейма и Десны. Вероятнее всего, первоначально «грузик», т.е. держатель фитиля устанавливался в миску, либо горшок баночной формы, небольшой высоты, чтобы данная комбинация сохраняла устойчивость. Тем не менее, в своем эксперименте, авторы сосредоточились именно на сковороде, т.к. можно констатировать, что «сковорода» гораздо проще в производстве, ее низкий бортик способствует большей отдаче света. В тоже время в научной среде нет описаний присутствия нагара на внешней стороне «сковородки», что дает авторам основание предположить, что данный предмет обихода не использовался в том качестве, которое ему приписывают, т.е. собственно как сковороде.

Также есть основания для указания на ряд обстоятельств – «грузик» в верхней части часто находят с налетом локального нагара (см. рис. 1, б, в), верхний выход канала часто бывает поврежден [4, рис. 70, С. 368]: «глиняные грузики со следами сработанности в канале», что вероятно вызвано постоянной прочисткой канала, протяжкой в процессе горения и установкой фитиля. Известны случаи находок «грузика» со шнуром, который, по мнению авторов, сохранился благодаря пропитке маслом, которое послужило веществом, замедлившим процесс разложения органической структуры шнура.

Исходя из вышеуказанных наблюдений можно предположить, что комплекс светильника включает в свой состав держатель фитиля, т.е. «грузик дьякового типа» и емкость для масла, представленная в виде «сковородки».

Для того, чтобы убедиться в своем предположении, авторы решили изготовить подобные «грузики» и «сковородки», и применить их в качестве

светильников в бытовой обстановке. Все предметы были обожжены на костре, имитируя очаг жилища.

Как часто описывают в научной литературе, что обжиг «дьяковцы» проводили в «костровой яме», поэтому был проведен аналогичный эксперимент. После того, как был закончен обжиг (рис. 2, *а*), сделаны шнурья из льняной пакли, а в качестве пропитки шнуря и топлива, налитого в сковородку, было использовано льняное нерафинированное масло. Вероятно, у дьяковцев были и иные источники топлива, но авторы использовали наиболее им доступный и простой вариант, предположительно существовавший в исторический период дьяковской культуры. В ходе эксперимента составленный светильник (рис. 2, *б*) дал достаточно большую площадь освещения, низкий бортик сковородки способствовал большей отдачи света с экономичным расходом масла в «сковороде», которое, в тоже время выполняло функцию отражателя света, пламя было устойчиво и стабильно, время горения без дополнительного обслуживания (протяжки фитиля и долива масла) составило 55 мин, а сам светильник был устойчивой конструкцией, что гарантировало низкую пожароопасность.



Рис. 2. Проведение эксперимента. Из фототеки авторов

Учитывая возможные диаметры сковородок «диаметр их 17–20, иногда 25 см» [9, С. 18], была проведена успешная попытка установки в нее одновременно трех «грузиков», т.е. держателей фитиля. Светильник продолжал функционировать (рис. 2, *в*), площадь освещения его соответственно увеличилась.

В результате проведенных экспериментов появилась уверенность, что вариант комбинации «грузика» и «сковородки» в качестве светильника возможен для дальнейшего обсуждения. В ходе исследования было подтверждено получение экономичного, относительно пожаробезопасного, достаточно простого в производстве и эксплуатации, эффективного масляного светильника.

## Список литературы

1. Воронцов А.М. Культурно-хронологические горизонты памятников II–V веков на территории Окско-Донского водораздела. Тула: Изд-во Государственного музея-заповедника «Куликово поле», 2013. С. 24–42.
2. Гусаков М.Г. Грузики «дьякова типа»: проблема назначения // Материалы научной конференции «Развитие цивилизации и Новый Свет: первые Кнорозовские чтения». М.: Изд-во РГГУ, 1999. С. 85–87.
3. Гусаков М.Г. Глиняные грузики и таблички дьяковской культуры: (к вопросу об их назначении) // Тверской археологический сборник. Вып. 6: Материалы III Тверской археологической конференции и 8-го заседания научного семинара «Тверская земля и сопредельные территории в древности». Тверь: Триада, 2007. Т. 2. С. 51–64.
4. Кренке Н.А. Дьяково городище: культура населения бассейна Москвы-реки в I тыс. до н.э. – I тыс. н.э. М.: Изд-во Института археологии РАН, 2011. 548 с.
5. Розенфельд И.Г. Керамика дьяковской культуры // Дьяковская культура. М.: Наука, 1974. С. 90–182.
6. Савенкова М.М. Экспериментальная реконструкция текстильных технологий у населения Восточной Европы начала железного века на основе дизайн-анализа керамического археологического материала // Археология евразийских степей (эпоха бронзы и ранний железный век). 2017. № 4. С. 297–303.
7. Смирнов К.А. К вопросу о систематизации грузиков «дьякова типа» с Троицкого городища // Древнее поселение в Подмосковье (Троицкое городище) / Отв. ред. Ю.А. Краснов. М.: Наука, 1971. С. 80–98.
8. Третьяков П.Н. Финно-угры, балты и славяне на Днепре и Волге. М.–Л.: Наука, 1966. 308 с.
9. Успенская А.В. Отчет о раскопках городища Подмоклово Серпуховского р-на, Московской обл. // Архив Института археологии РАН. 1957. № 1926.

**M.G. Gusakov, R.A. Meshkantsev**

Archaeological Surveys in Construction LLC, Moscow, arheolog-rus@yandex.ru

## UNIQUE ARCHAEOLOGICAL FINDS ON THE TERRITORY OF MOSCOW

**Abstract.** For many years now, archaeologists who's dealing with the Iron Age in Eastern Europe have been trying to determine the purpose and working affiliation of the so-called “Dyakov type weights”. At different times, various versions of the purpose of this subject were expressed. In our article, we tried to analyze the main versions of the ownership of weights expressed earlier and offer our own solution. To do this, we did a series of experiments with weights and pans and realized that our version has the right to exist. In our opinion, a weight in combination with a frying pan is a “oil fat” lamp.

**Key words:** Dyakov type weights; frying pans; Iron Age era; home; lamps; fire roasting.

**Вязкова О.Е., Гончарова Е.И.**

РГГРУ имени Серго Орджоникидзе, гидрогеологический факультет, кафедра инженерной геологии,  
г. Москва, wjask@yandex.ru, goncharova\_elizavet@mail.ru

## **ПРОБЛЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЦИТАДЕЛИ НАРЫН-КАЛА И ИХ РЕШЕНИЕ В ИСТОРИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ**

**Аннотация.** Исторические природно-технические системы, существующие несколько тысяч лет, «переживают» несколько фаз изменения влажности климата. В горных районах при строительстве фортификационных сооружений возможность устойчивого водоснабжения является определяющим условием возможности их функционирования. В публикации проанализированы инженерно-геологические и гидрогеологические условия создания в V–VI вв. сложной оборонительной системы в г. Дербенте – цитадели Нарын-Кала и стены Даг-Бары. Показано, что даже мастерство строителей не всегда могло обеспечить надежное водоснабжение, обусловленное уменьшением общей влажности климата района.

**Ключевые слова:** Дербент; цитадель Нарын-Кала; гидрогеологические условия; фортификация; водоснабжение.

Считается, что Дербент возглавляет список древнейших городов на территории России. Первые поселения на территории г. Дербента в северо-восточной части цитадели Нарын-Кала появились в III тысячелетии до н.э. [5]. Позднее (V–VI вв.) [5], когда город стал «торговыми воротами Кавказа», благодаря своему удачному географическому положению, уже потребовалось строительство сложной системы оборонительных сооружений (рис. 1). На мысу, ограниченному двумя глубокими оврагами и возвышающемся над приморской низменностью на 150–180 м, была возведена крепость (цитадель) Нарын-Кала. От нее на восток в сторону моря в V–VII вв. [5] построены две стены (Северная и Южная), защищающие собственно город и порт и препятствующие бесконтрольному перемещению «чужаков» в направлении север-юг. Для предотвращения передвижений неприятеля с севера в горах, в тылу города по осям хребтов в VI в. [7] была возведена оборонительная стена Даг-Бары с включенными в нее фортами (общая протяженность стены более 45 км) [7]. Цитадель, Северная и, частично, Южная стена сохранились до наших дней, местами проведена их реставрация. Стена Даг-Бары практически полностью была разобрана местным населением на строительство других сооружений после утраты фортификационного значения [1]. В настоящее время можно считать весь комплекс оборонительных сооружений в районе г. Дербента исторической природно-технической системой (ИПТС) с элементами природно-археологической системы (ПАС).

В результате хозяйственной деятельности сформировалась сложная ИПТС-ПАС, находящаяся на участках с разными инженерно-геологическими условиями. Можно выделить две области, где сооружения имеют определенное назначение.

1. Равнинный кластер, ограниченный (защищенный) восточной стеной крепости Нарын-Кала, Северной и Южной стенами самого г. Дербента,

ориентированный преимущественно на торговлю с перемещением товаров по суши и морю.

2. Горный кластер, имеющий исключительно фортификационное назначение, в который входят цитадель Нарын-Кала и стена Даг-Бары.

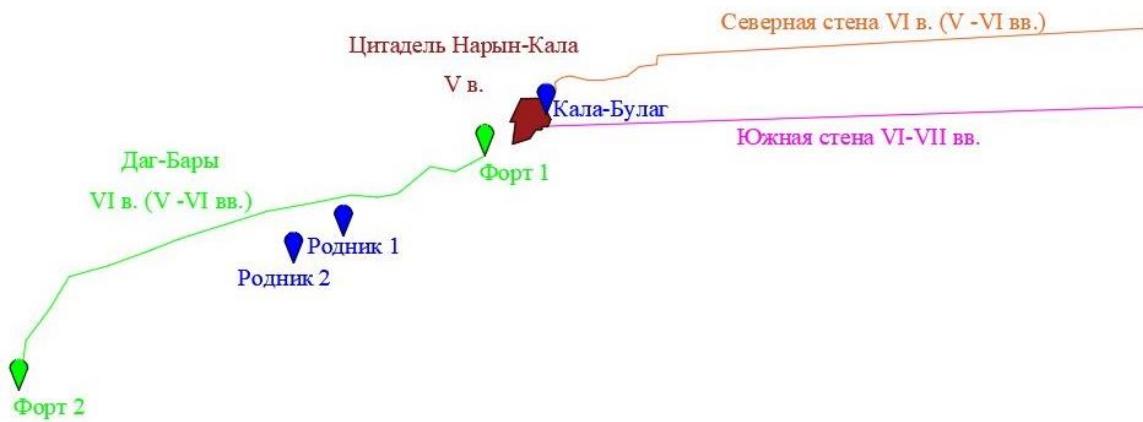


Рис. 1. Структура и периоды формирования Дербентского фортификационного комплекса с элементами водоснабжения

Оборонительное назначение сооружений предполагает наличие стабильных источников водоснабжения на подконтрольной защитникам территории. Для сложной ИПТС оказалось, что эти вопросы решались по-разному на территории каждого кластера в зависимости от геологического строения.

Охарактеризованы инженерно-геологические условия исследуемого района.

Современный климат Дербентского района можно охарактеризовать как переходный от умеренного к субтропическому. Амплитуда колебаний среднегодовой температуры в Приморской низменности 10–14°C. Годовое количество осадков здесь достигает 500 мм [3]. Можно предположить, что по мере увеличения абсолютных отметок рельефа количество осадков несколько увеличивается.

Изучаемая часть ИПТС располагается в пределах Дербентской моноклинали (рис. 2) в соответствии с отчетом о государственной геологической съемке масштаба 1:200 000 листов К-38-XVIII и К-39-XIII, подготовленным в 1939 г. исполнителем В.Д. Голубятниковым. Амплитуда отметок рельефа в ее пределах достигает 736 м (от -28,1 м – уровень Каспийского моря до 708 м – г. Джалган). Рельеф в горной части является структурно-денудационным, а на Приморской низменности – аккумулятивным. Восточный склон моноклинали прорезан большим количеством эрозионных лощин, имеющих V-образный профиль, которые формируют отдельные хребты, уступами снижающиеся в сторону моря. На одном из таких хребтов и расположен комплекс сооружений изучаемой ИПТС.

В геологическом строении горного кластера принимают участие среднесарматские песчаники и верхнесарматские известняки-ракушечники, переслаивающиеся с карбонатными глинами. Равнинный кластер сложен морскими четвертичными отложениями бакинской, хазарской и хвалынской трансгрессий Каспийского моря, представленными известняками-ракушечниками, галечниками песками, супесями и глинами.



Рис. 2. Общий вид с юга Дербентской моноклинали с характерными типами рельефа

Экзогенные геологические процессы также отличаются на каждом из изученных участков. На равнине это: оползневые деформации на верхних, пограничных с горной областью территориях, развитые в глинистых грунтах бакинского и хазарского возраста; незначительная заболоченность вдоль водотоков. В горном кластере преобладают выветривание, плоскостной смыв, съёмы, донная эрозия водотоков, сформированных преимущественно вкрест простирания неогеновых отложений.

Гидрогеологические условия равнинной территории характеризуются пологонаклонным в сторону моря залеганием порово-пластовых и трещинно-пластовых коллекторов. Питание горизонтов осуществляется за счет атмосферных осадков и перетока по зонам трещиноватости вод из нижележащих сарматских горизонтов. Водоснабжение основной городской территории осуществлялось копанными колодцами, расположенными в разных районах. В горном кластере распространены падающие под углом 25–28° в восток-северо-восточном направлении трещинные коллекторы в слоях песчаников и известняков. Они прорезаны и, соответственно, в значительной мере сдrenированы эрозионными врезами глубиной 20–30 м. Питание этих горизонтов происходит исключительно за счет атмосферных осадков, а разгрузка – в тальвегах врезов (рис. 3).

Такое геологическое строение не способствует формированию естественных родников на склонах. Тем не менее, только в пределах хребта, на котором расположена цитадель и отходящая от нее стена Даг-Бары с двумя фортами, авторами обнаружено три действующих каптированных источника. Анализ геологического строения структуры рельефа позволил выявить закономерность. Все три родника находятся в искусственных выемках грунта на той части склона, где проходит граница трещиноватых известняков и

подстилающих их глин. Родники действуют и в настоящее время (рис. 4). Следует отметить, что они все находятся на защищенной стеной Даг-Бары склоне хребта, т.е. всегда были доступны для водоснабжения фортов 1 и 2, а также самой цитадели Нарын-Кала (см. рис. 3, 4).



Рис. 3. Схематический геологический разрез, иллюстрирующий гидрологические условия на хребте, где расположена ИПТС «Нарын-Кала – Даг-Бары»



Рис. 4. Каптированные родники: а – родник 1 находится на склоне «южного» оврага, на абс. отм. 330 м; б – родник Кала-Булаг в нижней части территории крепости Нарын-Кала на абс. отм. 147 м

Согласно современным представлениям Кала-Булаг – «один из немногих древних родников Дербента, сохранившихся до наших дней» [8]. Общая система водоснабжения выглядела примерно так: «около естественных источников воды, расположенных высоко в горах, были сооружены каменные резервуары-накопители, из которых вода по подземным каменным трубам-желобам, такому древнему каменному водопроводу, поступала по мере продвижения сначала в крепость и наполняла верхние водохранилища, в частности, ханское

водохранилище, предназначенное для нужд самого правителя, затем по пути самотека поступала в верхний и нижний город» [8].

Как уже отмечалось одним из авторов [2] на основании установленной В.Г. Кривенко [4] природной цикличности климата в голоцене, древние ИПТС-ПАС за время своего функционирования «переживали» неоднократные изменения климатических условий и, как следствие, смену условий эксплуатаций сооружений, в т.ч. и гидрогеологических. Пользуясь выявленными закономерностями, можно предположить, что вся система оборонительных сооружений и, соответственно, их водоснабжения формировались во второй половине переходной фазы от прохладно-влажной к тепло-сухой (тепловая климатическая аномалия Европы наблюдалась с 950 по 1250 гг. [6]). Сейчас человечество находится в начале такой же переходной фазы, и на Земле наблюдается так называемое «глобальное потепление климата». Сейчас родники действуют, значит, на такой фазе систему имело смысл создавать. Когда климат стал более сухим, горные родники могли иссякнуть, при этом сохранение фортификации стало невозможным. По мнению А.А. Кудрявцева [5], водохранилище в цитадели не функционировало с VIII–IX вв. (приход арабов) до XVII–XVIII вв. Восстановление водохранилища совпадает наступлением следующей прохладно-влажной фазы климата, которую называют «малым ледниковым периодом» с 1350 по 1850 гг. [6].

В заключение можно отметить, что на равнинной территории г. Дербента во все исторические периоды была возможность устойчивого водоснабжения. Для фортификационных сооружений горного кластера (цитадель Нарын-Кала и стена Даг-Бары) в засушливые периоды и эпохи водоснабжение гарнизона становилось главной проблемой функционирования и, даже технически сложная система подачи и хранения воды не всегда могла ее решить.

## Список литературы

1. Бестужев-Марлинский А.А. Письма из Дагестана // Сочинения, в двух томах. 1981. М.: Художественная литература. Т. 1. 491 с. Т. 2. 593 с.
2. Вязкова О.Е. К вопросу об изменении инженерно-геологических условий в процессе эксплуатации архитектурных памятников // Сборник трудов VII Международного научно-практического симпозиума «Природные условия строительства и сохранения храмов Православной Руси». Сергиев Посад: Патриарший архитектурно-реставрационный центр. 2020. С. 119–123.
3. Данные о погоде, сайт meteoblue. 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.meteoblue.com/ru/climate-change/Дербент\\_Россия\\_566532?month=1](https://www.meteoblue.com/ru/climate-change/Дербент_Россия_566532?month=1) (дата обращения: 08.10.2023).
4. Кривенко В.Г. Концепция природной цикличности и некоторые задачи хозяйственной стратегии России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.ecoexpertcenter.ru/info/koncepciya\\_cikliki\\_144.html](http://www.ecoexpertcenter.ru/info/koncepciya_cikliki_144.html) (дата обращения: 08.10.2023).

5. Кудрявцев А.А. Дербент – древнейший город России на перекрестке цивилизаций, изд. доп. и дораб. Махачкала: Дагестанское книжное издательство, 2021. 384 с.
6. Соломина О.Н. Колебания ледников в голоцене и возможное влияние на них орбитального сигнала, солнечной и вулканической активности и анропогенного воздействия // Лед и снег. 2014. № 3(127). С. 81–90.
7. Журнал LiveJournal. 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru-travel.livejournal.com/33448818.html> (дата обращения: 08.10.2023).
8. Управление архитектуры и градостроительства городского округа «Город Дербент», 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://makederbent.ru/kalabulag> (дата обращения: 08.05.2023).

**O.E. Vyazkova, E.I. Goncharova**

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,  
Moscow, wjask@yandex.ru, goncharova\_elizavet@mail.ru

## **WATER SUPPLY PROBLEMS OF THE NARYN-KALA CITADEL AND THEIR SOLUTION IN THE HISTORICAL PAST**

**Abstract.** Historical natural and technical systems that have existed for several thousand years “endure” several phases of climate humidity change. In mountainous areas, during the construction of fortifications, the possibility of sustainable water supply is a determining condition for the possibility of their functioning. The article analyzes the geological-engineering and hydrogeological conditions for the creation of a complex defensive system in Derbent in the V–VI centuries – the citadel of Naryn-Kala and the walls of Dagh-Bara. The work shows that even the skill of builders could not always provide reliable water supply when the overall humidity of the climate decreased so much that groundwater could not form.

**Key words:** Derbent; Naryn-Kala citadel; hydrogeological conditions; fortification; water supply.

**Балашов А.Ю., Гусаков М.Г.**

ООО «Археологические изыскания в строительстве», г. Москва, Lahtak@list.ru, arheolog-rus@yandex.ru

## **МОСКВА КАК ГОРОД РОДИЛАСЬ В X в.?**

**Аннотация.** Публикация посвящена археологическим раскопкам древних курганов, которые были оставлены славянскими племенами вятичей и кривичей. Курганы начали раскапывать давно, еще в XIX в., и это можно считать началом московской археологии. В конце XIX в. к археологическим раскопкам присоединилась антропология, с этого момента в университетах городов Москвы и Санкт-Петербурга были образованы кафедры археологии. Так постепенно простой интерес к захоронениям в курганах перешел в профессиональную сферу. Таким образом началась археология славян, наших предков.

**Ключевые слова:** курганы; вятичи; кривичи; археологические раскопки; бронзовые украшения.

Старшее поколение москвичей наверняка помнит фразу «Москва – большая деревня», так вот в ней в XIX в. курганов от прошлых времен было великое множество. Они были везде, в дополнение к кладбищам в русских деревнях, и не только в дубравах, березняках, окружавших г. Москву, но и в многочисленных городских садах, огородах, да и просто во дворах, и все жители знали, что это могилы древних времен. Но кто именно их оставил, вот тут и была тайна. Что таилось было внутри этих курганов, мало кто знал. И все было бы по-старому, если бы в середине XIX в. не началось массовое увлечение раскопками именно курганов.

Следует уточнить, что среди историков XIX в. был веком сомнений, все выясняли вопрос – Россия древнее или молодое государство? Достаточно сказать, что у читающей публики было в ходу утверждение, что «Истории» до Нестора-летописца в России не было. Говорили, что мы молодой народ, «почти дикий». Были и такие, которые утверждали, что на месте Руси было «пустое место». Как ни странно, все же находились памятники глубокой старины, например, какие-то удивительные предметы попадались при рытье земли под огород или еще по какой-нибудь хозяйственной надобности, попадись «чудные» вещи, при этом вопрос – «чьи они?» – повисал в воздухе. Вспоминаются слова государственного деятеля, археолога и историка графа А.С. Уварова, их главный смысл можно выразить фразой: «Да, сейчас мы еще не дошли до понимания, каким народам принадлежат эти “первобытные памятники” и какое могли они иметь влияние на последующих наследников России, но то, что Россия в древности не была “пустым местом”, очень важно для русского самосознания» [7, С. 46; 12].

Именно в XIX в., по воскресным дням началось массовое увлечение всех слоев общества – ездить (или ходить) на раскопки курганов. Была и банальная причина этого интереса, возможность «случайно» разбогатеть, в качестве приза – найти антикварную вещь, за которую дадут приличные деньги, или найти клад. Это даже не обсуждалось... И все же к концу XIX в. общество научилось

работать с курганами по всем правилам науки с тщательными раскопками, чертежами, антропологическими определениями, хотя и не полные, но уже были описания инвентаря и деталей обряда. Правда, это все же еще уступало полноценному исследованию погребального обряда, но начало археологии было положено. После революции в археологию пришло новое поколение специалистов, которые заложили основу научного исследования. Уже в советское время, археологи старшего поколения и особенно А.В. Арциховский с коллегами и учениками, накануне Второй мировой войны, разработали схему раскопок курганных погребений, при которой все записывалось, как в бухгалтерскую книгу и фотографировалось. Так курган стал историческим источником и документом! После того, когда не только археологи, но и антропологи, подключились к изучению погребального обряда, постепенно все стало на свои места. Необходимо заметить, что только благодаря Д.Н. Анучину и его основательной деятельности, антропология помогла стать археологии вровень с зарубежной.

Среди археологов старшего поколения следует вспомнить раскопки А.Г. Векслера в городах Смоленске и Москве [4] и Р.Л. Розенфельдта в Москве и вокруг нее [9]. Так сложилось в их судьбе, что начало археологической деятельности было исключительно связано с раскопками курганов вятычей с 1959 до 1973 гг. У А.Г. Векслера главным археологическим источником были подмосковные курганные группы в с. Одинцово и его округе (рис. 1).



Рис. 1. Древнерусский курган у д. Клопово Одинцовского района  
Московской области [1, Разд. 25. С. 45]

Под руководством А.Г. Векслера за 13 лет из 261 курганов Одинцовской группы, которая состояла из девяти автономных некрополей, было раскопано и исследовано более 60 курганов: с мужскими, женскими и детскими останками на горизонте, с западной ориентировкой (рис. 2, 3). Среди вещественных находок – семилопастные височные кольца, в т.ч. решетчатое и с прорезченным

ромбиком на лопасти, бусы, шейные гривны, браслеты, перстни. Инструменты: железные ножи, цилиндрические замки, скобы, поясные пряжки и кольца, шиферные пряслица, точильные бруски, каменный пест, деревянная ложка – все предметы датируются XI–XIII вв. (рис. 4). Но А.Г. Векслер мечтал о раскопках курганов с кремацией, т.е. более ранних, относящихся к середине I тыс. н.э. То, что такие курганы были, у него не было сомнений, они были обнаружены в среднем и верхнем течении р. Оки.



Рис. 2. А.Г. Векслер – руководитель клуба юных археологов г. Москвы. Раскопки курганов в Спас-Тушине, 1961 г. [2, фотоальбом]



Рис. 3. Подмосковье, археологическая разведка. В центре – Р.Л. Розенфельдт, слева в первом ряду – М.Г. Гусаков. Личный фотоархив М.Г. Гусакова, 1964 г.

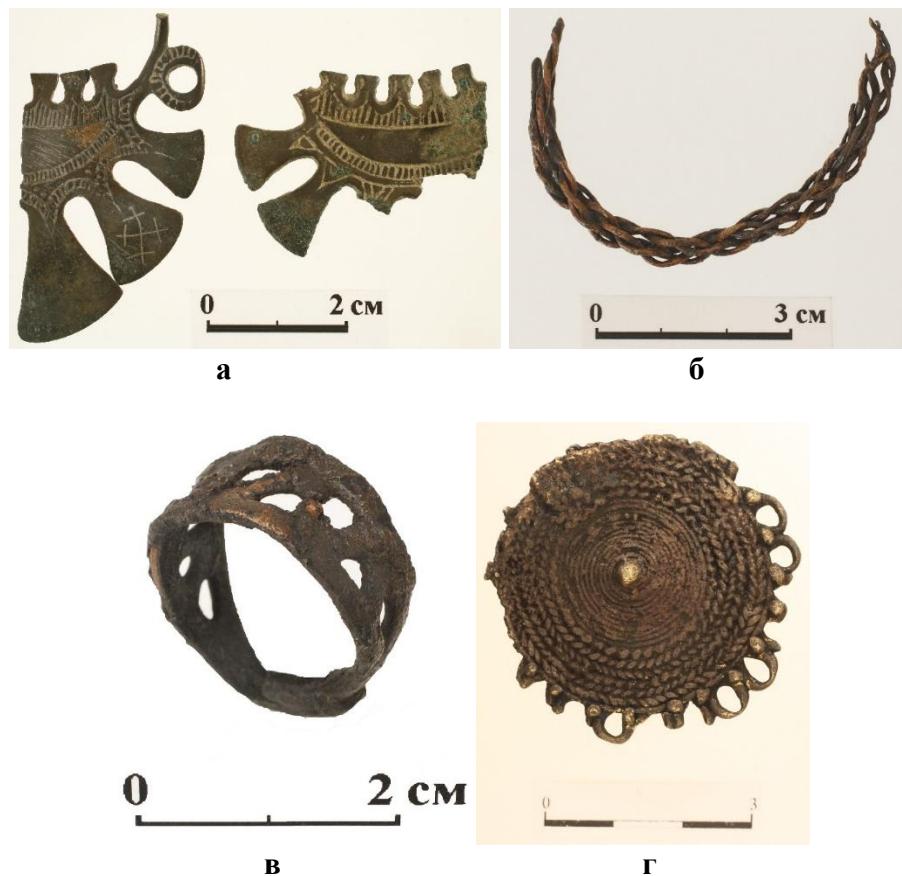


Рис. 4. Найдки из курганов вятичей: а – семилопастные подвески, б – шейная гривна из крученой бронзы, в – кольцо бронзовое решетчатое, г – умбоновидная подвеска из бронзы [6, С. 213. Илл. 217-219, 224]

Что мы знаем о Москве, о ее начале? Мало... Несколько страниц из великой книги «Повести временных лет», что вятичи – от рода ляхов. По летописям были два брата у ляхов – Радим, а другой – Вятко; «и пришли и сели: Радим на Соже, и от него прозвались радимичи, а Вятко сел с родом своим по Оке, от него получили свое название вятичи». И еще: «Все эти племена имели свои обычай, и законы своих отцов, и предания, и каждые – свой нрав. А радимичи, вятичи и северяне имели общий обычай: жили в лесу, как и все звери, ели все нечистое и срамословили при отцах и при снохах, и браков у них не бывало, но устраивались игрища между селами, и сходились на эти игрища, на пляски и на всякие бесовские песни и здесь умыкали себе жен по сговору с ними; имели же по две и по три жены» [11]. Когда человек умирал ... «то устраивали по нем тризну, а затем делали большую колоду, и возлагали на эту колоду мертвца, и сжигали, а после, собрав кости, вкладывали их в небольшой сосуд и ставили на столбах по дорогам, как делают и теперь еще вятичи». Этого же обычая держались и кривичи, и прочие язычники, не знающие закона Божьего, но сами себе устанавливающие закон» [11]. Собственно, это все, что мы знаем об этнографии славян, в частности, о радимичах, кривичах и вятичах. Все это было вероятнее всего в X в.

Из всех археологических памятников, доставшихся в наследство из прошлого, именно курганы оказались подвержены естественной утрате независимо от действий человека. Во-первых, много курганов утратилось от полевых ежегодных распашек; во-вторых, от вырубки леса, который рос на курганных группах и практически охранял их; в-третьих, от неудержимых крестьянских «грабежей», с неизбыtnым желанием «разбогатеть». А тут еще новая напасть. Нет в России – деревни, села, или маленького городишко, да и большого города, где бы внутри или вокруг него не было бы курганов. Могилы предков были везде и все об этом знали. Вот только копать их – было нельзя, вера в загробную жизнь, опять же христианский запрет на неприкосновенность царства мертвых, удерживало массы охочих людей «от святотатства». Наступивший XIX в. все изменил. Состоятельная публика: помещики (владельцы земель и власти), служащие, чиновники, священники, да просто крестьяне, словно помешались, все – пошли копать старые могилы предков! Следует напомнить, что «курган» – слово тюркского, а не славянского происхождения, в русской письменности употребляющееся только с XVI в. Раньше, вместо него использовались слово – «могила». У тюрок же «курган» означает – «крепость» [13].

Курганы вятичей просты по своей организации: погребение на материке, вокруг погребения ровик, который представляет остатки деревянной ограды, наподобие курганов VIII в., что были на Дону. Так же вятические курганы были похожи на курганы из сел Шаньково и Почепок, раскопанных еще Н.И. Булычевым в 1886 г., которые датируются серединой I тыс. н.э., где в центре насыпи помещались остатки от кремации после сожжения умершего. Но курганы вятичей с кремацией в Москве и Подмосковье, датируются не раньше – X в.

Вторую группу составляют курганы после предания умерших огню, производившимися на месте сооружения насыпей, как правило, на древнем горизонте. Четыре таких кургана известны в верховьях р. Москвы. Это Новинки, Красный стан 2, Тушков городок, Воронцово. Один курган (Кузнецово) находится в бассейне р. Клязьмы. Аналогии этой простой и маловыразительной разновидности предания умерших огню можно найти в различных районах восточно-славянского мира. Найдены, указывающие на дату, обнаружены только в кургане у Тушкова городка: это обломки пережженной ранней гончарной посуды, датированной X–первой половины XI вв.

Из всего комплекса археологических материалов IX–XIII вв. из районов Волго-Окского междуречья позволяют предполагать, что славянская колонизация территории нынешней Московской обл., началась в IX–X вв. Граница между зонами вятической и кривической колонизации определяется по распространению курганных погребений, характерных для тех и других по женским украшениям XI–XIII вв.

Курганы вятичей XII в. дошли до нас в изобилии, они имеются как вокруг г. Москвы, так и в самой Москве. Итак, мы имеем дело с достаточно значительным количеством предметов, явно относящихся к эпохе до

летописного периода, т.е. времени XI–начала XII вв. А.В. Арциховский в своих публикациях напоминал, что тема подлинной даты рождения г. Москвы вовсе не праздная выдумка ученых. В 1147 г. Москва уже городок, куда приглашают смоленского князя для серьезного разговора, значит в эти годы Москва – значимое поселение и совсем не «задворки» Сузdalского князя [4].

Необходимо начать с того, что русские летописи связывают земли вятичей с р. Окой. Повесть временных лет отмечает: «... а Вялько седе съ родомъ своимъ по Окде, от него же прозвавшися вятичи», а под 964 г. в связи с походом Святослава на северо-восток говорится: «И иде на Оку реку и на Волгу, и налезе вятичи» [8].

Надо сказать, что сведения о вятичах весьма скучны и опираться на них нет никакой возможности, единственное, что доподлинно есть – это курганные могильники и именно по ним можно составить не только представление о территории охвата географического пространства в Москве, ее ближайшей и дальней окруже. В распоряжении археологов есть несколько археологических карт, на которых указаны места расположения курганов вятичей.

Курганы в г. Москве и вокруг нее никто подробно не считал и не кодифицировал. До сих пор нет ясной цифры (хотя бы приблизительной) – сколько их было. В сборниках «Археологическая карта России», посвященных Подмосковью, а это четыре тома – указаны адреса, где были зафиксированы археологическими разведками уцелевшие курганы в разные годы. Следует заметить, что археологи во время подготовки издания не только находили новые или неизвестные до того времени курганы и курганные группы, но и фиксировали те, что знали раньше. Но многих из них уже в действительности не существовало.

Сегодня хорошо известно, что в Москве и вокруг нее известны курганы двух племенных группировок: вятичей (в южной половине г. Москвы) и кривичей (в северной и западной). Курганы вятичей прости по своей организации. Погребение на материке, вокруг погребения ровик, который представляет остатки деревянной ограды, наподобие Боршевских курганов, по своей конструкции так же похожи на вятические курганы Шаньково и Почепок, раскопанные Н.И. Булычевым в 1886 г. (датируются они серединой I тыс. н.э., где в центре насыпи совершился обряд предания умерших огнем) [5].

В 1885 г. А.М. Кельсиев сообщал, что в г. Москве и в Подмосковье зафиксировано 370 курганов в 45 пунктах. В 1930 г. А.В. Арциховский писал уже о тысячи курганов. В.В. Седов в книге о курганах Москвы и Подмосковья – сообщил, что к моменту написания автор опирался на данные в 40 тыс. курганов [11].

Как можно узнать, чей это курган? А.В. Арциховский выделил наиболее типичные вещи, которые входили в погребальный инвентарь вятичей: семилопастные височные кольца (см. рис. 4), хрустальные шарообразные и желтые стеклянные шарообразные бусы, решетчатые перстни, пластинчатые загнутоконечные браслеты, именно эти предметы позволили в деталях обрисовать вятическую племенную территорию. В то время, когда

А.В. Арциховский писал монографию о вятических древностях, материалов о курганах с кремацией в исследуемом регионе было очень немного и они не были опубликованы. Он привел слова летописца: «И ради ми чи, и вятичи, и северъ одинъ обычай имѧху: ...аще кто умряше, творяху тризну надъ нымъ, и по семь творяху кладу велику, и възложаху на кладу, мертвѣца сожъжаху, и посемь собравше кости вложаху в судину малу, и поставляху на столпе на путех, еже творять вятичи и ныне» – и сделал вывод, что до XII в. вятичи хоронили «на столпе, на путях», а от такого обряда на долю археологов ничего не остается [3].

Однако по мере накопления новых материалов, в частности из широких раскопок на поселениях I тыс. н.э., оказалось, что древности типа Шаньково–Почепок принадлежат неславянскому населению. Это были памятники мосцинской культуры, оставленные предками летописной голяди [11, С. 41–45].

В большинстве случаев собранные с погребального костра кальцинированные кости кучкой или в глиняной урне устанавливались прямо в курганной насыпи, в ее основании или верхней части. Многие насыпи содержали по одному захоронению, другие – от двух до четырех. Большинство погребений лишено вещей. Вещи встречены только в двух захоронениях: в одном – сплавленные стеклянные бусы, биллоновая ажурная пряжка и медные спиральки, в другом – железная пряжка. Глиняные урны из курганов имеют аналогии среди материалов расположенного рядом поселения, нижний слой которого относится к VIII–X вв.

Аналогичные курганы с захоронениями по обряду предания умерших огню исследованы во многих местах по берегам верхней части р. Оки и на ее притоках. Сожженные кости, собранные с погребального костра, помещены чаще в основаниях насыпей. Однако, бывает и так, что большинство погребений не содержит ни урн, ни вещей. Датируются вятические курганы с останками преданных огню в целом VIII–X вв., но отдельные захоронения этого вида, очевидно, могут быть отнесены и к XI–XII вв. Древности ранних вятичей по основным особенностям – керамическому материалу, домостроительству (рис. 5) и погребальному обряду – сопоставимы с синхронными славянскими культурами более южных областей Восточной Европы.

Курганы с наличием останков умерших людей, преданных огню, занимают всю территорию вятичей (рис. 6). Могильники состоят из нескольких десятков насыпей. Иногда встречаются курганные группы, насчитывающие свыше сотни насыпей. По-видимому, в XI в. вятичи из Верхнеокского региона поднялись по р. Оке и, достигнув устья р. Москвы, повернули на северо-запад, заселив районы нижнего и среднего течения этой реки. Верховья р. Москвы, а также левые притоки р. Оки между реками Уграй и Москвой в этот период еще не были освоены славянами.

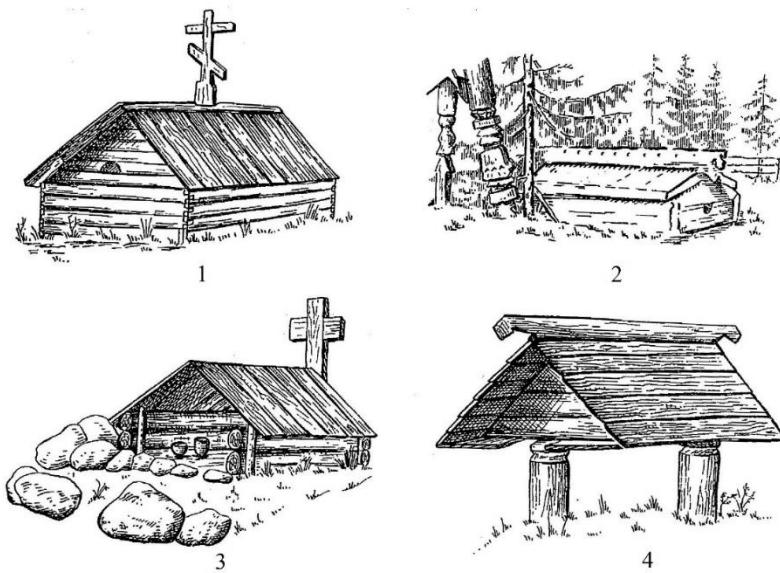


Рис. 5. Домовины («столпы»). Обозначения: 1 – Солотча (г. Рязань), 2 – Север, 3 – Карелия, 4 – Лехтинский район, хутор Рию-Варнка [10, С. 92]

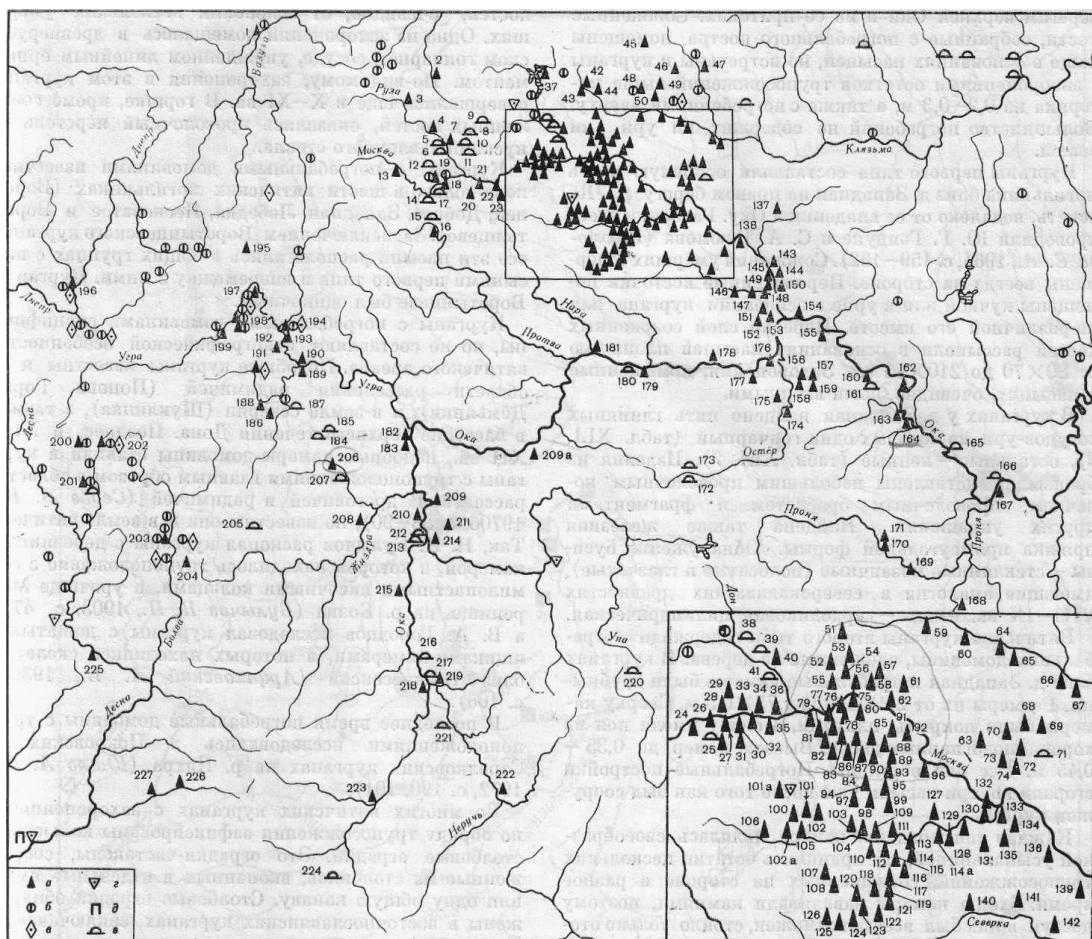


Рис. 6. Карта курганов вятичей в г. Москве и Подмосковье с местами находок:  
 а – семилопастных височных колец; б – браслетеобразных височных колец;  
 в – ромбошитковых колец; г – семилучевых колец; д – спирально витых колец;  
 е – курганы без находок [11, С. 144]

В заключении необходимо отметить одну очень важную мысль, что в первые века освоения этого пространства вятичами, курганы в X–XI вв. расположены в междуречье рек Яузы и Неглинной, впадающих в р. Москву. Это место было не только племенным некрополем, но и поселением, именно они жили там, занимались земледелием, разводили скот, прожили три столетия (может быть немногим меньше), укрытые мощными лесными массивами, практически недоступными долгое время для чужаков.

И еще авторам хотелось бы отметить, что для археологов в г. Москве при подготовке котлованов для строительства зданий и сооружений, очень важно иметь достаточный по времени доступ для проведения археологических раскопок особенно нижнего предматерикового слоя, потому как именно в нем могут быть остатки курганных погребений и инвентаря. К сожалению, строители не всегда дают археологам эту возможность.

### Список литературы

1. Археологическая карта России. Московская обл. Ч. 1. / Под ред. Ю.А. Краснова. М.: Институт археологии, 1994. 320 с.
2. Археология Москвы. Линия жизни / Под ред. Л.В. Кондрашева // Сборник статей и материалов к 80-летию А.Г. Векслера. М.: ООО «Т-Принт Групп», 2012. 310 с.
3. Арциховский А.В. Курганы вятичей. М.: Изд-во Российской ассоциации научно-исследовательских институтов общественных наук, 1930. 221 с.
4. Арциховский А.В. Основные вопросы археологии Москвы // Материалы и исследования по археологии СССР. 1947. № 7. С. 7–22.
5. Булычов Н.И. Журнал раскопок 1898 г. по берегам Оки. М.: Товарищество типографии А.И. Мамонтова, 1899. 23 с.
6. Векслер А.Г. Москва. Раскопки на Великом Посаде: улица Ильинка, Биржевая площадь, старый Гостиный двор. Материалы исследований. М.: ТМ Продакшн, 2015. 460 с.
7. Платонова Н.И. История археологической мысли в России. Вторая половина XIX – первая треть XX века. СПб.: Нестор-История, 2010. 316 с.
8. Повесть Временных лет по Лаврентьевской летописи 1377 г., 2- изд., испр. и доп. СПб.: Наука, 1996. С. 10–11.
9. Розенфельдт Р.Л., Юшко А.А. Список археологических памятников Московской области. М., 1973. 265 с.
10. Рыбаков Б.А. Язычество Древней Руси М.: Наука, 1987. 782 с.
11. Седов В.В. Восточные славяне в VI–XIII вв. // Археология СССР. М.: Наука, 1982. 327 с.
12. Спицын А.А. Расселение древнерусских племен по археологическим данным. СПб.: типография В.С. Балашев и К°, 1899. 40 с.
13. Формозов А.А. Следопыты земли Московской. М.: Московский рабочий, 1988. 140 с.

Материалы XVIII Общероссийской научно-практической конференции  
«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»,  
г. Москва, 28 ноября – 1 декабря 2023 г.

**A.Yu. Balashov, M.G. Gusakov**

Archaeological Surveys in Construction LLC, Moscow, Lahtak@list.ru, arheolog-rus@yandex.ru

## **MOSCOW HOW WAS THE CITY BORN IN THE 10th CENTURY?**

**Abstract.** This article is devoted to the archaeological excavations of ancient burial mounds left by the Slavic tribes of Vyatichi and Krivichi. The mounds were first excavated in the 19th century, which can be considered the beginning of Moscow archaeology. At the end of the 19th century, anthropology joined the archaeological excavations, and from that moment on, departments of archaeology were formed in the universities of Moscow and Saint Petersburg. Thus, gradually, a simple interest in who was buried in the mounds turned into a professional sphere. This was the beginning of the archaeology of the Slavs, our ancestors.

**Key words:** mounds; Vyatichi; Krivichi; archaeological excavations; bronze jewelry.

**Фролов Н.В.**

ООО «Археологические изыскания в строительстве», г. Москва, arheolog-rus@yandex.ru

## **ПРОБЛЕМЫ И НАХОДКИ НА ОБЪЕКТАХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ РАСКОПОК В г. МОСКВЕ**

**Аннотация.** Предлагается введение в научный оборот информации о находках и локализация мест обнаружения на территории г. Москвы достаточно редких, но в то же время информативных находок, относящихся к кругу славянских древностей. Показано, что наиболее полным определением наименования подобных находок следует считать термин «амулет в виде привески-колесика с центральным полым каналом» с уточнением датировки. Вводимые в научный оборот находки можно достоверно рассматривать как культурные маркеры славянского населения на территории современной Москвы, с признанием исходного заимствования форм из южных регионов Скандинавии и, шире, севера Европейского региона через первоначальные формы раннего средневековья.

**Ключевые слова:** археология г. Москвы; славянские древности; бляшка-колесико; амулет-колесико; амулет в виде привески с центральным полым каналом.

Целью данной публикации является введение в научный оборот информации о находках и локализация мест обнаружения на территории г. Москвы достаточно редких, но в то же время информативных находок, относящихся к кругу славянских древностей: это так называемые круглые **бляшки-колесики** [2, определение], или **амулеты-колесики** [3, определение]. Автору представляется, что наиболее полным определением наименования подобных находок следует считать термин *амулет в виде привески-колесика с центральным полым каналом*.

За последние несколько лет в поле зрения археологов ООО «Археологические изыскания в строительстве» попало четыре амулета в виде привески-колесика с центральным полым каналом; три из них изготовлены из свинцово-оловянного сплава, один – из медного сплава. В результате планомерных археологических раскопок были обнаружены три экземпляра и еще один экземпляр был передан археологам строителями без точной локализации обнаружения (рис. 1). Из обнаруженных в ходе раскопок экземпляров, все три были обнаружены в переотложенном состоянии, без синхронных слоев древнерусского времени. Однако следует отметить, что вместе с обнаружением данных находок, в двух случаях был обнаружен (также в переотложенном состоянии) археологический материал, соотносимый со славянскими древностями – «серая» (середина XIII–середина XIV вв.) и «курганная» керамика (XII–XIII вв.). Найдено, в т.ч. и в переотложенном состоянии, позволяющих предположить иной этносубстрат (финно-угорские, скандинавские, тюрские или иные племена), обнаружено не было.

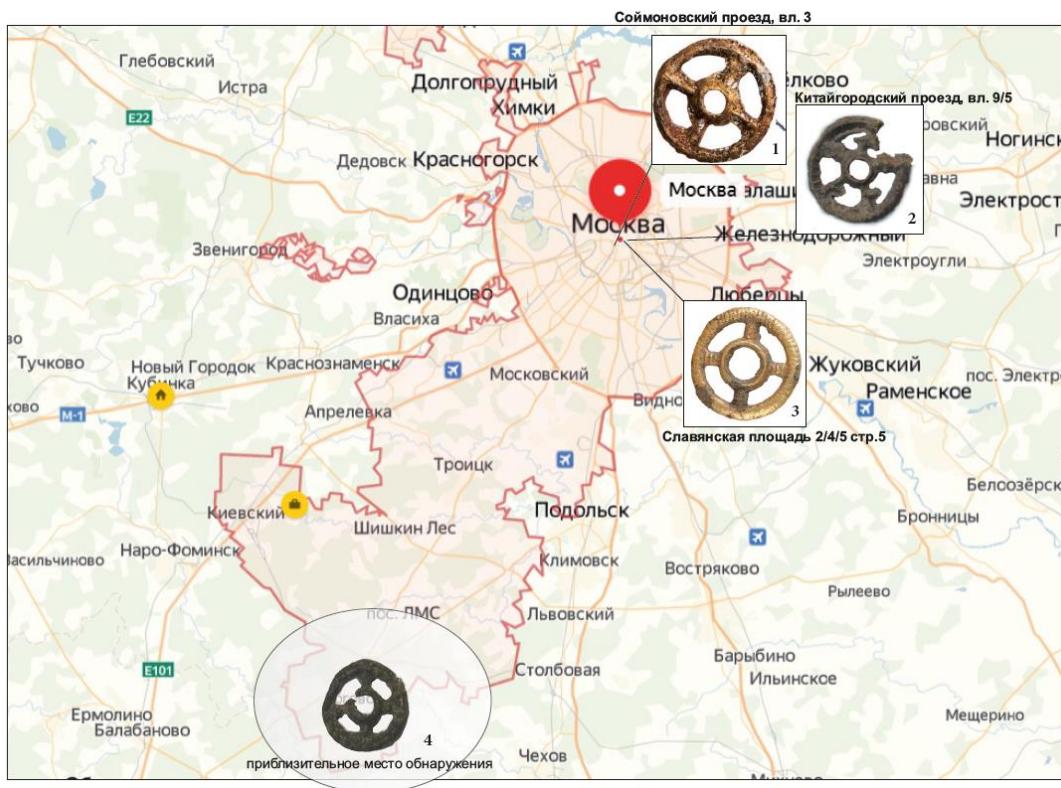


Рис. 1. Места обнаружения находок амулетов в виде привески-колесика с центральным полым каналом на территории г. Москвы

Амулет в виде привески-колесика с центральным полым каналом, обнаруженный в ходе работ 2015–2016 гг. на Симоновской проезде, вл. 3 (работы В.А. Берковича) (рис. 2). Нахodka была предварительно атрибутирована как «крестовидная подвеска свинцово-оловянного сплава (№ 237, описание 2). Подвеска представляет собой равносторонний крест с центральным полым каналом, включенный в кольцо». Обстоятельства находки: обнаружена в переотложенном состоянии, в слоях конца XVIII–XIX вв. Вместе с находками этого времени, были обнаружены несколько фрагментов «серой» и «курганной» керамики.

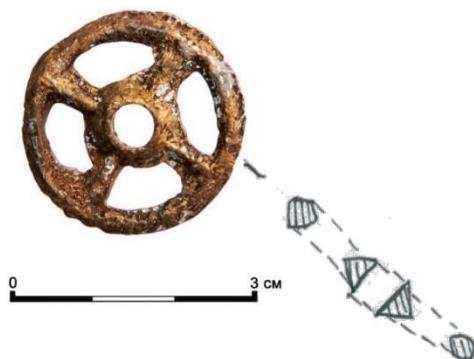


Рис. 2. Амулет в виде привески-колесика с центральным полым каналом, свинцово-оловянный сплав, раскопки 2015–2016 гг. на Симоновском проезде, вл. 3 (№ 237, раскоп 2, кв. 2В, глубина –422 см)

Амулет в виде привески-колесика с центральным полым каналом, обнаруженный в ходе работ 2019 г. на Славянской площади, д. 2/4/5, стр. 5 (работы А.Ю. Балашова) (рис. 3). Изделие представляет собой «крестообразную круговую нашивную (?) подвеску медного сплава, диаметром 2,3 см, с центральным отверстием 0,9 см. Кольцо подвески и лопасти внутреннего креста оформлены орнаментом в виде жгута (№ 78, описание 1)». Обстоятельства находки: обнаружена в переотложенном состоянии, в слоях середины XVIII в. Материал древнерусского времени в раскопе обнаружен не был.



Рис. 3. Амулет в виде привески-колесика с центральным полым каналом, медный сплав, раскопки 2019 г. на Славянской площади, д. 2/4/5, стр. 5 (№ 78, описание 1, кв. Д5, глубина – 363 см)

Амулет в виде привески-колесика с центральным полым каналом, обнаруженный в ходе работ 2019–2020 гг. на Китайгородском проезде, вл. 9/5 (работы В.А. Берковича) (рис. 4). Изделие «сохранилось с незначительными утратами. Изделие свинцово-оловянного сплава, диаметром 2,6 см, с центральным полым отверстием диаметром 0,6 см. От полого центрального канала отходят пять симметричных лучей-спиц, заключенных в окружность, с утолщениями на концах (№ 8, описание 9)». Обстоятельства находки: обнаружена в переотложенном состоянии в балластных напластованиях XX в. В раскопе был зафиксирован археологический материал, датируемый от XX в. до древнерусского времени (керамика «серая», «курганная», «красная гладкая ранняя», кресала железные); а также (локально) скопление неолитической керамики льяловской археологической культуры (IV тыс. до н.э.).

Случайная находка амулета в виде привески-колесика с центральным полым каналом (рис. 5). В 2015 г. строители, ведущие прокладку дорог в Новой Москве, передали в дар «небольшое свинцово-оловянное изделие, в виде колеса (или креста в круге). Диаметр 2,5 см, в центре – отверстие. Все грани покрыты крупной зернистью». Обстоятельства находки не ясны – изделие привезли вместе с грунтом для строительства насыпи, откуда-то с юга Новой Москвы (присоединенные территории 2014 г.). Другой информации у строителей не было.



Рис. 4. Амулет в виде привески-колесика с центральным полым каналом, свинцово-оловянный сплав раскопки 2019–2020 гг. на Китайгородском проезде, вл. 9/5(№ 8, раскоп 1, описание 1, кв.15, глубина –99 см)



Рис. 5. Амулет в виде привески-колесика с центральным полым каналом, свинцово-оловянный сплав. Случайная находка с территории юга присоединенных территорий Новой Москвы, 2015 г.

Подобные предметы при охранных городских раскопках обнаруживаются редко [1]. По мнению О.А. Щегловой, подобные нашивные бляшки входят в набор наиболее характерных свинцово-оловянных украшений северного региона VIII–X вв. [7, С. 142, 145, рис. 1, 20–26]. Подобные случайные находки в малом числе обнаруживаются на юге до Калужской области. Найдены этой категории обнаружены и в верхнем Поочье [5, С. 90, рис. 58], а также на правобережье р. Оки ниже устья р. Упы [2, С. 261, рис. 11–13], где датируются древнерусским временем (рис. 6).

В целом, по мнению О.А. Щегловой, происхождения подобных изделий отмечается с эпохи раннего средневековья, в круге славянских древностей Румынии, Поднестровья, Побужья и Польши. В то же время, типологически сходные находки из серебра, отличающиеся лучшим качеством изготовления, уверенно соотносятся с северными регионами Европы: юг Скандинавии, север Германии, север Польши. Известны находки подобных амулетов-привесок в

Гнездово, где они признаются маркером культурной принадлежности северных языческих культов [6]. Считается, что амулеты более грубого качества (сходные с ныне вводимыми в научный оборот), имитировали собой более дорогие материалы. Так, серебро замещалось свинцово-оловянистыми сплавами, а золото – медными.



Рис. 6. Аналогии московских находок

В ареале обитания славянских племен кривичей и вятичей (куда входит и территория современной Москвы), в курганах X–XII вв., также находят подобные предметы. Бляшки-колесики преобладают в наборе украшений северных регионов ареала распространения славян; считается, что они являются результатом эволюции «южных» прототипов [7, С. 145–147]. В целом, подобные украшения получают распространение в третьей четверти I тыс. н.э. в южных и центральных районах Восточной Европы (пражская, пеньковская, колочинская археологические культуры), а также там, где фиксируется их культурное влияние (район р. Верхняя Волга) [7, С. 145]. Назначение подобных предметов: нашивка-украшение на одежду.

В восточном от г. Москвы направлении, в Приобье, интересные аналогии московским находкам датируются XVI–XVII вв. и соотносятся с местным туземным населением, где подобные находки интерпретируются как местное подражание привозным русским украшениям, либо являются позднейшим воспроизведением сюжетов Волго-Камья IX–XI вв., восходящими к более

ранним образцам V–VII вв. [4, С. 203, 259, рис. 2.3.9 (316-331), подтип I ажурные «солярные】. Отмечается немногочисленность данной категории находок.

Сакральная форма изделия – круг, как и образ колеса в целом, достаточно подробно исследованы в археологической, этнографической и теологической литературе. Следует отметить несомненную связь изделия как с солярной символикой, так и с круговым движением времени, и в целом с дохристианскими культурами плодородия и возобновления жизни.

Вариант вида крепления описан Н.В. Ениосовой [3, С. 92] по кладу 2015 г. с острова Зеландия (Дания). У всех амулетов-колесиков из этого комплекса, в отверстие ступицы продета серебряная проволока, плотно закрученная над ободом и образующая ушко-петлю. Сами изделия клада изготовлены из медного сплава с позолотой. Они украшали ожерелье из стеклянных бусин.

Уверенные датировки бытования этих находок на территории г. Москвы будут получены при нахождении объектов в хорошо стратифицированных слоях и датированных комплексах. Пока же возможно принять за датировку для московского региона период X–XIII вв.

Исходя из вышесказанного, по мнению автора, вводимые в научный оборот находки можно достоверно рассматривать как культурные маркеры славянского населения на территории современной Москвы, с признанием исходного заимствования форм из южных регионов Скандинавии и, шире, севера Европейского региона через первоначальные формы раннего средневековья.

## Список литературы

1. Воронцов А.М., Модин Р.Н. Древнерусский горизонт городища Акиньшино // Археология Подмосковья. 2014. Вып. 10. С. 251–264.
2. Векслер А.Г. Раскопки на Великом посаде. Теплые торговые ряды. М.: Триумф прнт, 2009. 223 с.
3. Ениосова Н.В. «Жили в лесу, молились колесу...» (о новой находке скандинавского амулета из Гнездова) // Культурний шар. Статті на пошану Гліба Юрійовича Івакіна. Київ: Лаурус, 2017. С. 86–96.
4. Кардаш О.В., Визгалов Г.П. Городок Монкысь Урий: к истории населения Большого Югана в XVI-XVII веках, в двух томах. Екатеринбург – Нефтеюганск: Караван, 2015. Т. I. 447 с. Т. II. 208 с.
5. Прошкин О.Л. Чертово городище: освоение славянами Верхнего Поочья. Калуга: Золотая аллея, 2011. 124 с.
6. Пушкина Т.А., Мурашева В.В., Ениосова Н.В. Гнездовский археологический комплекс // Русь в IX–X веках. Археологическая панорама. Вологда: Древности Севера, 2012. С. 242–273.
7. Щеглова О.А. Свинцово-оловянные украшения VIII-X вв. на Северо-Западе Восточной Европы // Ладога и ее соседи в эпоху средневековья. СПб.: Изд-во Института истории материальной культуры РАН, 2002. С. 134–150.

**N.V. Frolov**

Archaeological Surveys in Construction LLC, Moscow, arheolog-rus@yandex.ru

## **PROBLEMS AND FINDS AT ARCHAEOLOGICAL EXCAVATION SITES IN MOSCOW**

**Abstract.** It is proposed to introduce into scientific usage information about finds and localize the places of discovery on the territory of Moscow of quite rare, but at the same time informative finds related to the circle of Slavic antiquities. It is shown that the most complete definition of the name of such finds should be considered the term “amulet in the form of a pendant-wheel with a central hollow channel” with clarification of the dating. The finds introduced into scientific circulation can reliably be considered as cultural markers of the Slavic population on the territory of modern Moscow, with the recognition of the initial borrowing of forms from the southern regions of Scandinavia and, more broadly, the north of the European region through the original forms of the early Middle Ages.

**Key words:** archeology of Moscow; Slavic antiquities; wheel plaque; amulet-wheel; amulet in the form of a pendant with a central hollow channel.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

**Бобачев А.А., Миринец А.К.**

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, bobachev@gmail.com

### ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЕ

**Аннотация.** Геофизические исследования в транзитной зоне являются наиболее сложным объектом. Методики, разработанные отдельно для акваторий или для суши, плохо применимы в таких условиях. Авторы показывают примеры проведения полевых работ в таких условиях методом электротомографии с использованием донной установки. Особенность такой установки – возможность проведения работ как на суше, так и на мелководье, обеспечивая непрерывный набор данных «суша – акватория». Полевые работы выполнялись на различных объектах, расположенных в Обской губе Карского моря. Работы на севере Обской губы в переходной зоне «река – море» показали, что удельное сопротивление воды и приливы оказывают большое влияние на результаты электроразведочных работ. По этой причине вышеупомянутые факторы необходимо учитывать при проведении полевых работ.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы; донная электротомография; инженерно-геологические изыскания; транзитная зона; электроразведка.

Метод электротомографии (ЭТ) успешно применяется при картировании мерзлых пород. Удельное электрическое сопротивление талых и мерзлых пород обычно существенно различаются. По областям распространения пород с высоким удельным сопротивлением можно картировать мерзлые образования. Поэтому включение электроразведки в комплекс инженерно-геофизических исследований практически всегда является оправданным и даже необходимым.

При работах на акваториях можно выделить три подхода к выполнению работ методом электротомографии. Первый, самый простой, использовать обычные косы для работ на суше. В зимних условиях – это работа с поверхности льда с пробуриванием лунки для электродов. В летнее время плавучесть кос обеспечивается с помощью поплавков. Таким образом выполняются многоэлектродные зондирования с неподвижной косой с поверхности водоема. Как обеспечивается неподвижность косы в условия ветра – непонятно. Авторы такой подход не использовали.

Другой подход – использование буксируемой установки и выполнение непрерывных акваторных зондирований [1, 4]. Основное преимущество этого подхода – высокая скорость полевых наблюдений. Однако при работе с поверхности акватории вода будет первым исследуемым слоем, который обычно не представляет интереса. Если глубина воды небольшая (до 5 м), то слой воды не будет оказывать значительного влияния на результаты интерпретации. Но при увеличении глубины водоема разрешающая способность метода для изучения верхнего слоя отложений будет уменьшаться. С другой стороны, используя

акваторные зондирования, невозможно провести наблюдения в зоне предельного мелководья – зоне прибоя. Поэтому между наблюдениями на суше и на воде возникает область, в которой отсутствуют геофизические наблюдения. Второй альтернативный подход удобно применять в условиях предельного мелководья (глубина воды 2–6 м).

Третий подход – использование донной установки для электротомографии. В отличие от измерений на поверхности воды, работы с донными установками проводятся достаточно редко [2, 3, 5]. Это в первую очередь связано с низкой скоростью проведения полевых геофизических работ, т.к. они проходят в режиме «старт – стоп» с полной смоткой-размоткой косы для каждой раскладки. С другой стороны, эта методика позволяет проводить работы в широком диапазоне глубин: от 30 м до нуля и даже на суше, раскладывая и подключая донную косу как обычные сухопутные косы.

Немаловажным преимуществом донной томографии является то, что вода гораздо меньше мешает исследованию донных отложений, особенно если она пресная. Таким образом, донная электротомография – метод, наиболее подходящий для работ как в транзитной зоне (глубина воды до 2 м), так в зоне мелководья (глубина воды до 20–30 м). Кроме того, появляется возможность совмещать в одной расстановке донные и поверхностные наблюдения, что обеспечивает непрерывность геофизических наблюдений как на суше, так и на акватории (рис. 1).



Рис. 1. Выполнение работ с маломерного судна (а) и в сухопутном варианте (б). Из фототеки авторов

В качестве примера использования донной томографии рассмотрены полевые работы в районе пос. Сабетта Ямальского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Это переходная зона «река – море». Ее особенность: высокие приливы (до двух метров) и высокая изменчивость удельного сопротивления воды (от 1 до 10 Ом·м) во время проведения работ. Это потребовало сопровождать полевые работы гидрологическими наблюдениями с

применением эхолота и резистивиметра. В результате было отработано более 10 км профилей методом электротомографии с шагом по профилю 4 м. Используемая установка с 72 электродами обеспечивала формальную глубинность до 50 м (рис. 2).

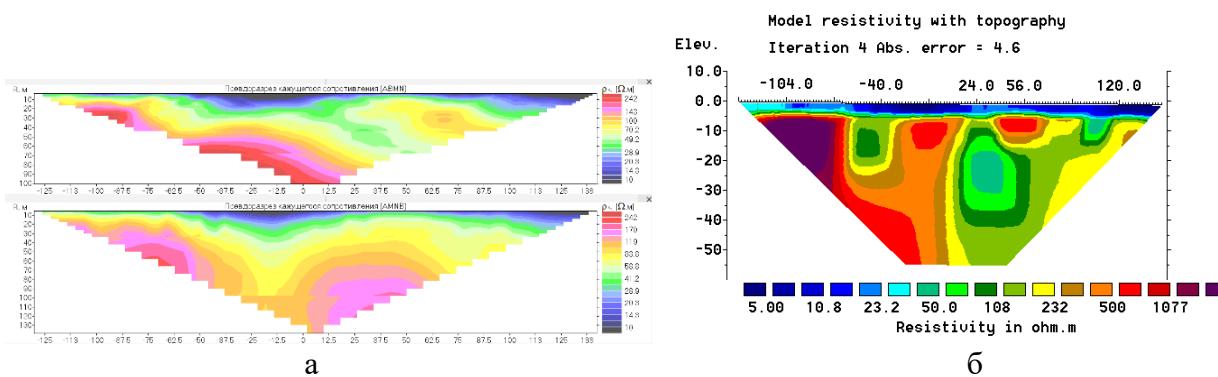


Рис. 2. Пример полевых данных (а) и геоэлектрический разрез по результатам 2D инверсии для одной расстановки (б)

В результате удалось откартировать мерзлые породы на достаточно большой территории, которые встречаются по всей зоне осушки (рис. 3).

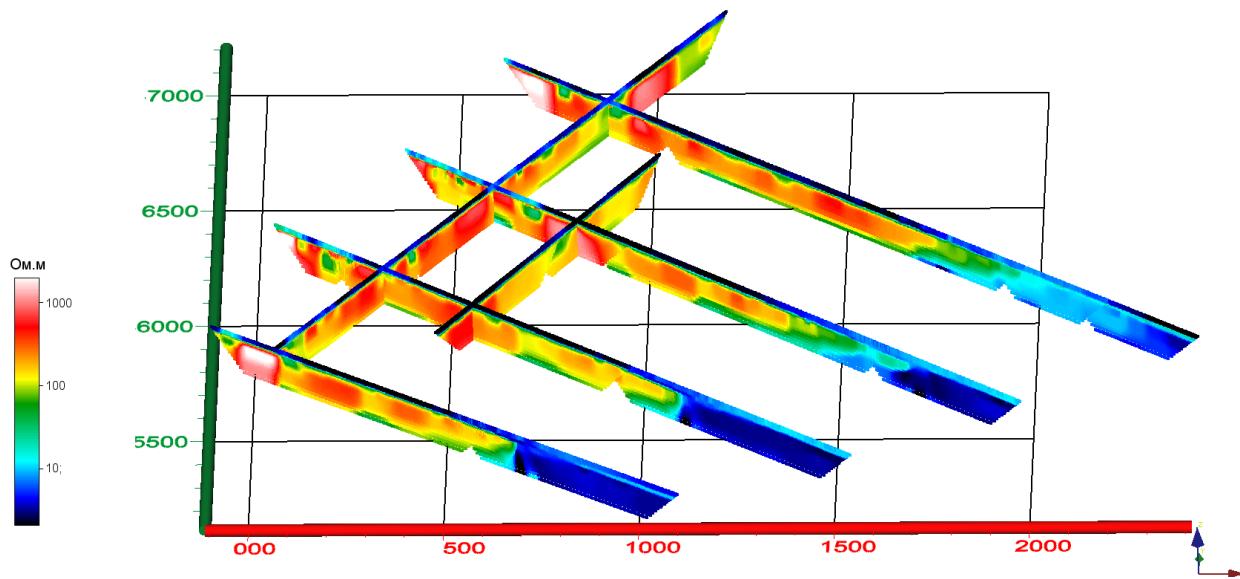


Рис. 3. 3D представление результатов электротомографии

### Список литературы

1. Бобачев А. А., Ерохин С. А. Практика применения электротомографии на малоглубинных акваториях // Инженерные изыскания. 2011. № 11. С. 24–29.
2. Миринец А.К., Бобачев А.А., Миронюк С.Г. Выделение мерзлых и газонасыщенных грунтов в Обской губе Карского моря по данным донной

электротомографии в комплексе с акустическим профилированием и бурением // Геофизика. 2022. № 6. С. 33–41.

3. Dahlin T., Loke M.H. Underwater ERT surveying in water with resistivity layering with example of application to site investigation for a rock tunnel in central Stockholm // Near Surface Geophysics. 2018. Vol. 16. P. 230–237.
4. Rucker D.F., Noonan G.E. Using marine resistivity to map geotechnical properties: A case study in support of dredging the Panama Canal // Near Surface Geophysics. 2013. Vol. 11. P. 625–637.
5. Toran L., Johnson M., Nyquist J., Rosenberry D. Delineating a road-salt plume in lakebed sediments using electrical resistivity, piezometers, and seepage meters at Mirror Lake, New Hampshire, U.S.A. // Geophysics. 2010. Vol. 75. No. 4. P. 75–83.

**A.A. Bobachev, A.K. Mirinets**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, bobachev@gmail.com

## **ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY IN TRANSIT ZONE**

**Abstract.** Geophysical research in the transit zone is the most complex object. Techniques developed for water areas or land are poorly applicable in such conditions. The authors show examples of field work using such electrical tomography methods using a bottom installation. The peculiarity of such an installation is the ability to carry out work both on land and in shallow water, providing a continuous collection of land-water data. Field work was carried out at various sites in the Gulf of Ob. Work in the north of the Ob Bay in the river-sea transition zone has shown that water resistivity and tides have a great influence on the results of electrical exploration work and must be taken into account when conducting field work.

**Key words:** permafrost soils; electrical resistivity tomography; engineering-geological surveys; transit zone; electrical prospecting.

**Строчков Ю.А.<sup>1</sup>, Капустин В.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУ «Росгеолфонд», г. Москва, idw83@mail.ru

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики,  
г. Москва, 1391853@mail.ru

## **СВЯЗЬ АТРИБУТОВ ТЕХНОГЕННЫХ ВИБРАЦИЙ И СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА**

**Аннотация.** Развитием методики вибронаблюдений является использование динамических свойств сигналов природного и техногенного происхождения для оценки изменения характеристик грунтовых массивов. Оценки разрешающей способности предлагаемой методики показывают, что она является достаточно чувствительной для выявления деформационных свойств грунтов на ранней стадии их изменения. Анализируя динамические характеристики регистрируемых сигналов, удается выделить в грунтовых массивах области с пониженными прочностными и деформационными свойствами. Получаемые данные могут быть использованы для оценки последствий выносов в котлованы, устойчивости откосов железноз- и автодорожных насыпей, гидротехнических дамб и плотин и т.п. Наблюдение за изменением динамических характеристик сигнала позволяет качественно оценить изменение характеристик среды.

**Ключевые слова:** инженерные изыскания; измерение вибраций; динамические характеристики колебаний; спектр Накамуры.

Регистрация вибраций на поверхности грунта позволяет получать информацию о характере волнового поля. По происхождению вибрации могут быть природными и техногенными. Источниками природных вибраций являются отголоски дальних землетрясений, прохождение циклонов, морской прибой, течение рек, качающиеся от ветра деревья. Техногенные вибрации возникают при движении колесного и рельсового транспорта, работе строительной техники и механизмов. Каждый тип источника техногенных вибраций создает колебания специфической формы и частотного состава. Основные параметры зарегистрированных колебаний, такие как длительность, пиковая и среднеквадратичная амплитуды, амплитуда фоновых колебаний, частотный спектр, средневзвешенная частота спектра и частоты максимумов в спектре в основном характеризуют источник колебаний. Рассчитанные атрибуты вибраций, например, частоты и значения максимумов в спектре Накамуры, добротность и уязвимость, позволяют получить дополнительную информацию о строении и состоянии грунтового массива, на поверхности которого производилась запись.

В спектре отношения горизонтальных компонент к вертикальной могут возникать пики, связанные с резонансом вибраций в верхнем более рыхлом слое, по частоте которых возможно оценить глубину залегания отражающей границы. Такой метод называется Horizontal to Vertical Spectrum Ratio (HVSR). Зная скорость поперечных волн  $V_s$  в верхнем слое, можно из формулы определить его мощность  $H$ :

$$F_{\text{пика}} = V_s/4H, \quad (1)$$

где  $F_{\text{пика}}$  – частота максимума в спектре Накамуры. Опыт использования данного метода [1–4] показал его эффективность при решении задач выделения в грунтовом массиве ослабленных зон и оценки глубины залегания кровли дочетвертичных отложений.

Выделение ослабленных зон в грунтовом массиве, в т.ч. в составе геотехнических сооружений, таких как дамбы, возможно путем анализа динамических характеристик колебаний, являющихся значительно более чувствительными к изменению прочностных свойств среды, чем кинематические параметры. На рис. 1 приведен скоростной разрез поперечных волн, полученный по грунтовой дамбе. Разрез практически горизонтально-слоистый и на нем не выделяются скоростные аномалии. На рис. 2 приведен график распределения амплитуды максимума в спектре по тому же профилю. На графике явно выделяются три точки с повышенными значениями амплитуды. В указанных точках в теле дамбы проходят коммуникации от насосных станций, по которым вибрации от насосов передаются в грунт, разуплотняя его.

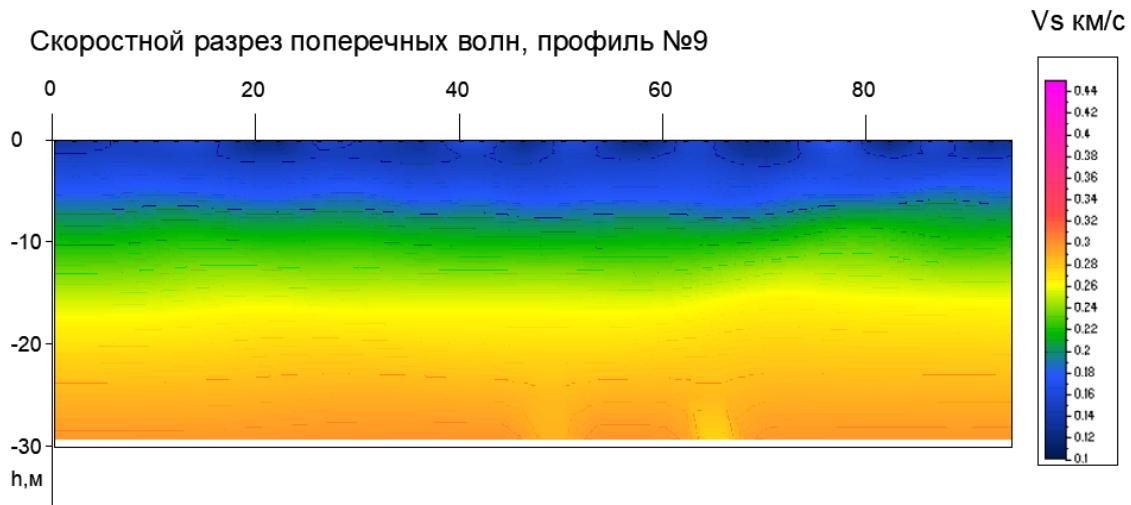


Рис. 1. Типичный скоростной разрез по обследованной дамбе в г. Волгограде

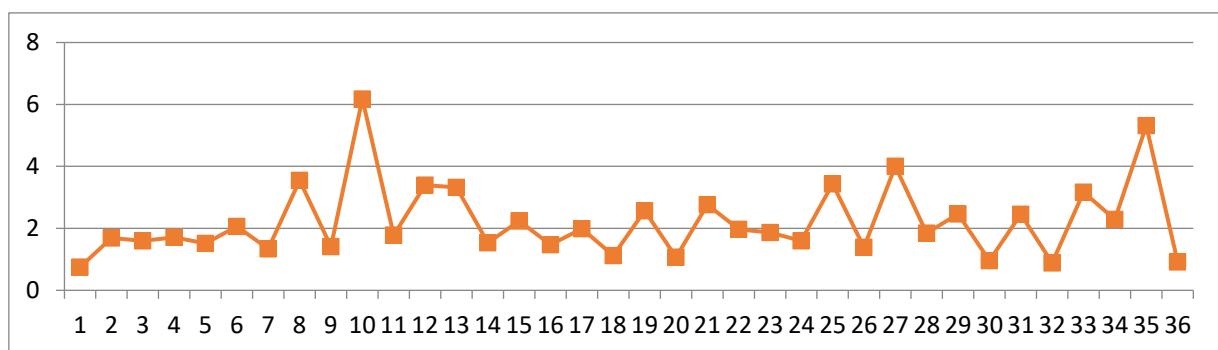


Рис. 2. Распределение амплитуды максимума в спектре по профилю

Положение выделенных ослабленных зон в теле дамбы подтвердились высокими значениями коэффициента уязвимости, рассчитанного по формуле:

$$K_y = a^2/f, \quad (2)$$

где  $f$  – частота максимума в спектре Накамуры,  $a$  – амплитуда этого максимума.

Амплитуда максимума в спектре Накамуры, обусловленного наличием в разрезе контрастной границы практически не зависит от амплитуды источника. На рис. 3 показана амплитуда максимума в спектре Накамуры на записях: фоновых колебаний (а) и при прохождении состава метрополитена (б).

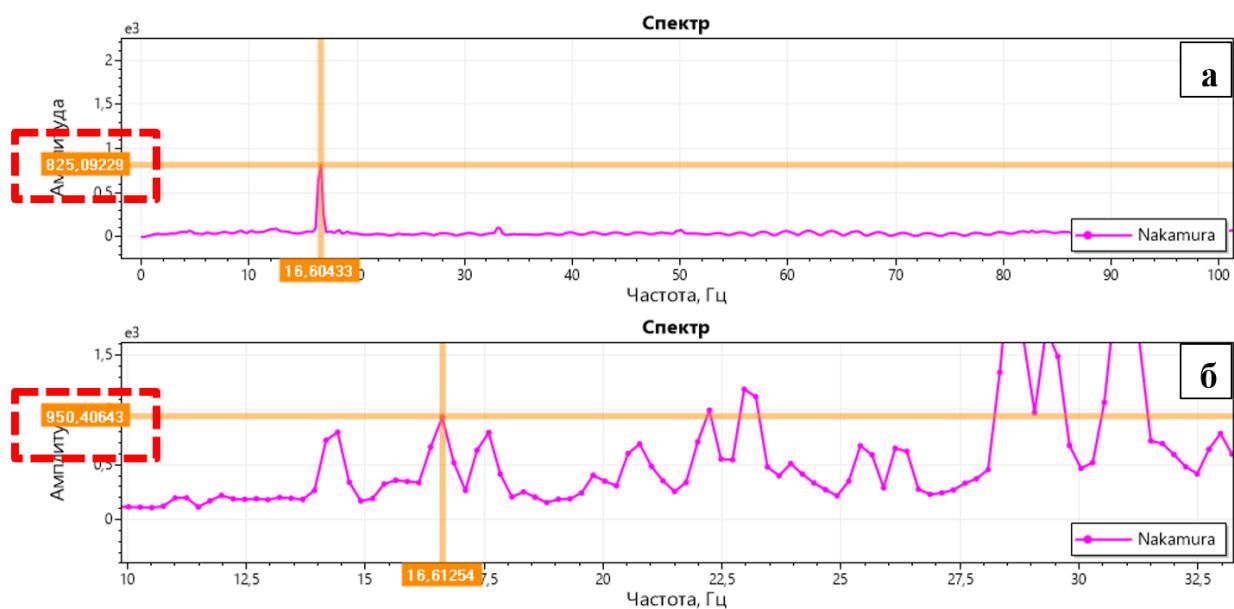


Рис. 3. Амплитуда максимума в спектре Накамуры на записи фоновых колебаний (а) и на записи при прохождении состава метрополитена (б)

Пики в спектре Накамуры сейсмических сигналов могут быть объяснены не только с позиции резонансных эффектов в слоистой среде. Вид графика функции спектральной плотности мощности сигнала определяется свойствами среды и интерференцией колебаний от различных источников. Это могут быть также кратные отражения и отражения от локальных объектов, находящихся в грунтовом массиве. Наличие резонансных явлений обусловлено образованием стоячих волн в слоистой среде. Из практики известно, что определению наличия стоячих волн способствует проведение серий измерений, отстоящих друг от друга, с последующим суммированием трасс или мультиплексированием их спектров. Если в методах, использующих активные источники, определению резонансных частот может способствовать выбор вида источника, то для обработки данных пассивных методов требуются другие приемы.

Резонансные явления, кратные отражения и отражения от локальных объектов определяют свойство стационарности регистрируемых техногенных микросейсм в каждой конкретной точке. Для оценки параметров стационарного случайного процесса применяются периодограммные методы спектрального оценивания.

Как показывает опыт наблюдений, амплитуда сейсмической волны находится в обратной зависимости от величины акустической жесткости и поглощения, причем эта связь частотнозависимая. Наличие поглощения приводит к появлению дисперсии фазовой скорости. Данные явления, в соответствии с законом сохранения энергии, приводят к перераспределению амплитуды в спектре волны. На плотных грунтах амплитуда падает, а спектр волны расширяется и, наоборот, в рыхлых грунтах амплитуда растет, спектр сужается. Аналогичные выводы можно получить, анализируя выражение, называемое иногда акустическим законом Ома:

$$U = \frac{P}{\rho C}, \quad (3)$$

где  $U$  – амплитуда скорости колеблющейся частицы;  $P$  – амплитуда давления;  $\rho$  – плотность среды;  $C$  – скорость распространения звука в среде;  $\rho C$  – акустическая жесткость или акустическое сопротивление.

Исследование строения и свойств грунтового массива возможно путем регистрации техногенных и природных вибраций на дневной поверхности с последующим анализом динамических характеристик колебаний, являющихся значительно более чувствительными к изменению прочностных свойств среды.

## Список литературы

1. Строчков Ю.А., Капустин В.В. Опыт применения метода HVSR для определения «контрастных» инженерно-геологических границ // Инженерная геология. 2023. Том XVIII. № 1. С. 68–78. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-1-68-78>.
2. Contribution of HVSR measures for seismic microzonation studies / R. Martorana, P. Capizzi, A. D'Alessandro, D. Luzio, P. Di Stefano, P. Renda, G. Zarcone // Annals of Geophysics. 2018. Vol. 61. No. 2. ID SE225. <https://doi.org/10.441/ag-7786>.
3. Mucciarelli M., Gallipoli M.R. A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2001. Vol. 42. No. 3–4. P. 255–266.
4. Xu R., Wang L. The horizontal-to-vertical spectral ratio and its applications // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2021. ID 75. <https://doi.org/10.1186/s13634-021-00765-z>.

**Yu.A. Strochkov<sup>1</sup>, V.V. Kapustin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Russian Federal Geological Fund, Moscow, idw83@mail.ru  
<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 1391854@mail.ru

## **RELATIONSHIP OF ATTRIBUTES OF TECHNOGENIC VIBRATIONS AND THE STATE OF THE SOIL MASSIF**

**Abstract.** The development of the vibration observation technique is the use of the dynamic properties of signals of natural and man-made origin to assess changes in the characteristics of soil massifs. Estimates of the resolution of the proposed method show that it is sensitive enough to detect the deformation properties of soils at an early stage of their change. By analyzing the dynamic characteristics of the recorded signals, it is possible to identify areas in soil massifs with reduced strength and deformation properties. The obtained data can be used to assess the consequences of drifts into pits, the stability of slopes of railway and road embankments, hydraulic dams, etc. Observing changes in the dynamic characteristics of the signal allows us to qualitatively assess changes in the characteristics of the environment.

**Key words:** engineering surveys; vibration measurement; dynamic characteristics of vibrations; Nakamura spectrum.

**Бобачев А.А.<sup>1</sup>, Миринец А.К.<sup>1</sup>, Великин С.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, bobachev@gmail.com  
<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, frozen@mirny.sakha.ru

## **КАРТИРОВАНИЕ МЕРЗЛОТЫ НА ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ**

**Аннотация.** Геофизические исследования водных объектов являются достаточно сложной задачей и требуют использования специализированных инструментов. Для электротомографических наблюдений авторы предлагают использовать донную электротомографию в сочетании со стандартными сухопутными методиками. Такой комплекс позволяет получить непрерывный набор при пересечении водных объектов. В работе показаны примеры использования описанного комплекса при картировании мерзлоты в различных районах Российской Федерации. Также приведены результаты наблюдений по методике непрерывных акваторных зондирований при исследовании русел рек.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы; донная электротомография; инженерно-геологические изыскания; акваторные зондирования; электроразведка.

Электроразведка на постоянном токе (метод сопротивлений) успешно применяется при картировании мерзлых горных пород. Удельное электрическое сопротивление талых и мерзлых пород обычно различаются, что позволяет по областям с высоким удельным электрическим сопротивлением выделять области распространения мерзлых горных пород.

Современной методикой метода сопротивлений является электротомография (ЭТ). Применение электротомографии существенно повысило надежность интерпретации и практически вытеснило традиционный метод ВЭЗ при детальных работах.

Обычно электротомографические работы проводят на суше, т.к. именно на это рассчитана стандартная методика и аппаратура. В то же время именно под водоемами температурный режим горных пород существенно отличается от примыкающих к ним берегам. Поэтому при геокриологических исследованиях важно сочетать наблюдения на суше с работами на акваториях. При работах на воде применяют два способа проведения электротомографических наблюдений.

Первый подход – это применение буксируемой установки и выполнение непрерывных акваторных зондирований [1, 4]. Основное преимущество этого подхода – высокая скорость полевых наблюдений. Но для его применения необходимы протяженные достаточно прямолинейные участки реки или открытые водоемы. Это связано с большой длиной используемой косы (140–300 м). Другая проблема, что при измерениях с поверхности водоема слой воды будет первым из исследуемых. Если глубина воды небольшая (до 5 м), то слой воды не будет оказывать значительного влияния на результаты интерпретации. Но при увеличении глубины водоема разрешающая способность метода для изучения верхнего слоя отложений будет уменьшаться. Кроме того, используя акваторные зондирования, невозможно провести наблюдения в прибрежной

зоне. Поэтому между наблюдениями на суше и на воде возникает область, в которой отсутствуют геофизические наблюдения.

Второй подход – это работа с донной установкой для электротомографии. В отличие от измерений на поверхности воды, работы с донными установками проводятся достаточно редко [2, 3, 5]. Это, в первую очередь, связано с низкой скоростью проведения полевых работ, т.к. работы проходят в режиме «старт – стоп» с полной смоткой-размоткой косы для каждой раскладки. С другой стороны, эта методика позволяет проводить работы в широком диапазоне глубин: от 30 м до нуля и даже на суше, раскладывая и подключая донную косу как обычные сухопутные косы. Более того, возможно сочетание в одной расстановке обычных сухопутных кос и донной. Это очень удобно, когда профили наблюдений пересекают водные объекты.

Немаловажным преимуществом донной томографии является то, что наличие водяного слоя оказывает гораздо меньшее влияние на получаемые данные при исследовании донных отложений, особенно если она пресная. Таким образом, донная электротомография – метод, наиболее подходящий для работ проведения на водных объектах (рис. 1).



Рис. 1. Выполнение работ с маломерного судна (а) и с берега (б). Из фототеки авторов

В качестве примера авторами показано использование донной томографии на водохранилище г. Удачный (Якутия). Профили электротомографии длиной до двух километров пересекали водохранилище на р. Сытыкан. На суше работы проводились с обычными косами с шагом 5 м. На воде использовалась донная коса с шагом 4 м. Использовалась аппаратура Syscal Pro Switch 72 (IRIS Instruments, Франция). У берега подключались различные косы в одной

расстановке, т.е. 36 электродов с шагом 4 м и 36 электродов с шагом 5 м. На рис. 2 показан фрагмент полевых данных и их 2D инверсия.

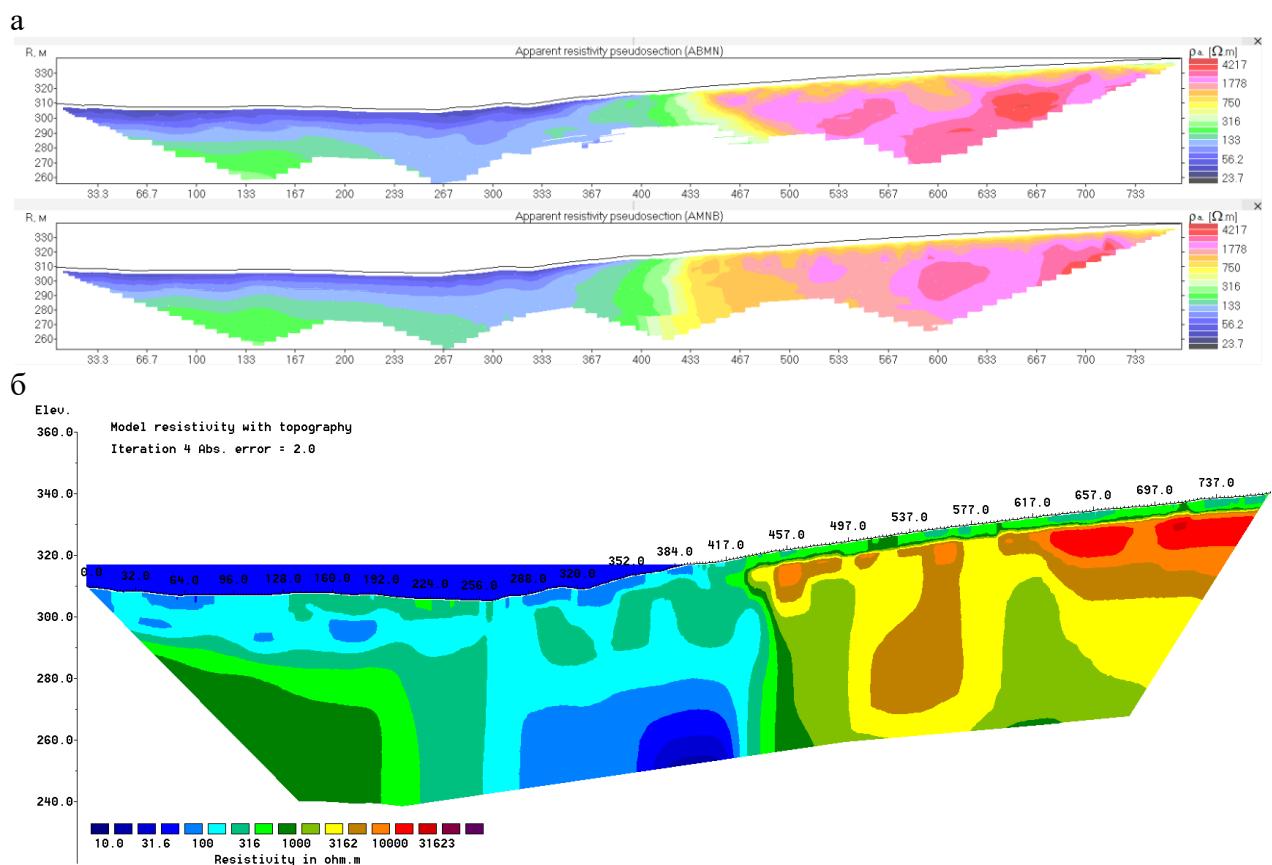


Рис. 2. Пример полевых данных (а) и геоэлектрический разрез по результатам 2D инверсии для одной расстановки (б)

На рис. 3 показан пример 2D инверсии по одному из профилей.

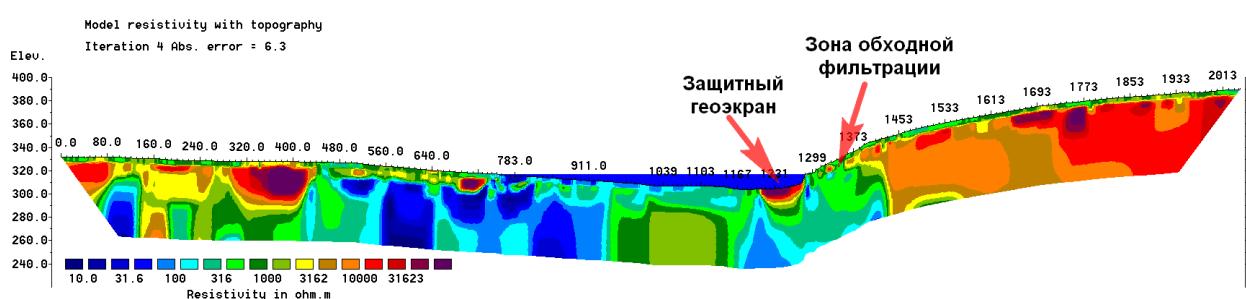


Рис. 3. Пример 2D инверсии по профилю через водохранилище

Из рис. 3 видно, что защитный геоэкран служит очень слабой защитой для остановки обходной фильтрации по правому берегу водохранилища на р. Сытыкан. Кроме того, достаточно сложным оказалось строение левого берега,

где проводящие талые породы наблюдаются достаточно далеко от берега водохранилища – на расстоянии 300 м.

### Список литературы

6. Бобачев А.А., Ерохин С.А. Практика применения электротомографии на малоглубинных акваториях // Инженерные изыскания. 2011. № 11. С. 24–29.
7. Миринец А.К., Бобачев А.А., Миронюк С.Г. Выделение мерзлых и газонасыщенных грунтов в Обской губе Карского моря по данным донной электротомографии в комплексе с акустическим профилированием и бурением // Геофизика. 2022. № 6. С. 33–41.
8. Dahlin T., Loke M.H. Underwater ERT surveying in water with resistivity layering with example of application to site investigation for a rock tunnel in central Stockholm // Near Surface Geophysics. 2018. Vol. 16. P. 230–237.
9. Rucker D.F., Noonan G.E. Using marine resistivity to map geotechnical properties: A case study in support of dredging the Panama Canal // Near Surface Geophysics. 2013. Vol. 11. P. 625–637.
10. Toran L., Johnson M., Nyquist J., Rosenberry D. Delineating a road-salt plume in lakebed sediments using electrical resistivity, piezometers, and seepage meters at Mirror Lake, New Hampshire, U.S.A. // Geophysics. 2010. Vol. 75. No. 4. P. 75–83.

**A.A. Bobachev<sup>1</sup>, A.K. Mirinets<sup>1</sup>, A.S. Velikin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, bobachev@gmail.com

<sup>2</sup>Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, frozen@mirny.sakha.ru

## **MAPPING OF PERMAFROST ON HYDRAULIC STRUCTURES USING ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY**

**Abstract.** Geophysical research of water bodies is a rather complex task and requires the use of specialized tools. For electrical tomographic observations, the authors propose to use bottom electrical tomography in combination with standard land methods. This complex allows you to get a continuous set when crossing water bodies. The work shows examples of the use of such a complex when mapping permafrost in various areas. Also shown are the results of observations using the method of continuous aquatic soundings when studying river channels.

**Key words:** permafrost soils; bottom electrical tomography; engineering-geological surveys; water soundings; electrical prospecting.

